



# Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925-1960)

Adrien Vila-Valls

## ► To cite this version:

Adrien Vila-Valls. Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925-1960). Autre [cond-mat.other]. Université Claude Bernard - Lyon I, 2012. Français. NNT : 2012LYO10218 . tel-00993036

**HAL Id: tel-00993036**

**<https://theses.hal.science/tel-00993036>**

Submitted on 19 May 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ecole Doctorale E.P.I.C. (Education, Psychologie, Information et Communication)

THESE

Présentée pour obtenir

Le titre de docteur en Epistémologie et Histoire des Sciences et des Techniques

par

Adrien Vila Valls

Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France  
(1925-1960)

Thèse dirigée par Jan Lacki et Hugues Chabot

Soutenue le 14 Novembre 2012 devant le jury composé de :

Olivier Darrigol (Rapporteur)	<b>Directeur de recherches</b> – CNRS
Olival Freire Junior (Rapporteur)	<b>Professeur</b> – Universidade Federal da Bahia
Philippe Lautesse (Examineur)	<b>Professeur</b> – Université Lyon 1
Jean-Paul Martin (Examineur)	<b>Directeur de recherches</b> – CNRS
Jan Lacki (Directeur de thèse)	<b>Directeur de recherches</b> – CNRS
Hugues Chabot (Directeur de thèse)	<b>Maitre de conférences</b> – Université Lyon 1

## Remerciements

Je souhaite tout d'abord exprimer ma gratitude à Hugues Chabot et Jan Lacki qui me suivent maintenant depuis quelques années.

J'ai pu bénéficier au sein du laboratoire S2HEP à l'Université Lyon 1 de très bonnes conditions de travail. Je voudrais remercier toute l'équipe et en particulier les deux présidents successifs Philippe Jaussaud et Philippe Lattes, ainsi que l'organisateur du séminaire des doctorants, Jacques Toussaint. J'y inclue Pierre Cresson, non membre mais très proche du laboratoire, et toujours disponible pour dispenser ses précieux conseils.

Ce travail a bénéficié d'entretiens que m'ont accordés Georges Lochak, Jacques Friedel, François Lurçat, Jean-Louis Basdevant, André Martin, Maurice Klemm, Maurice Lévy et Cécile Morette-Dewitt. Eliane Proca et Pierre Petiau m'ont également permis d'avoir accès à des archives d'Alexandre Proca et de Gérard Petiau. A tous, je veux exprimer ma reconnaissance.

Je suis reconnaissant envers les personnels des archives nationales et de la bibliothèque de l'Institut Henri Poincaré, et surtout celui des archives de l'Académie des Sciences de Paris.

Je tiens également à remercier les membres du jury, notamment Jean-Paul Martin, Olivier Darrigol et Olival Freire Junior que je n'ai pas encore cités, pour leurs questions, remarques et commentaires.

Je remercie une seconde fois Olival Freire Junior qui m'a proposé de présenter mon travail au colloque des jeunes chercheurs en histoire de la physique organisé en juillet 2011 par l'*American Institute of Physics (AIP)* à College-Park, ainsi que Gregory Good et l'équipe du *Center for History of Physics* de l'*AIP* qui a pris en charge financièrement une partie de mon voyage.

Je ne voudrais enfin pas oublier les échanges plus ponctuels, mais néanmoins précieux, que j'ai pu avoir durant ces trois années avec Martha-Cécilia Bustamente, Michel Paty et Basarab Nicolescu.

# Sommaire

Repères chronologiques .....	7
Introduction générale .....	9
I- Spécificités de la mécanique quantique .....	12
II- Perspectives et limites de l'étude .....	15
III- Présentation des chapitres .....	16
IV- Sources.....	17
Chapitre I. Panorama du paysage institutionnel et socioculturel de la physique française des années de l'entre-deux guerres .....	19
I- Une brève histoire des institutions scientifiques françaises jusqu'aux années 1920 .....	19
1- À l'origine de la science française institutionnalisée.....	19
2- L'école Polytechnique .....	20
3- L'École normale supérieure et les Facultés des sciences .....	20
4- La thèse du déclin .....	23
II- Spécificités de la physique théorique en France avant l'émergence de la mécanique quantique .....	24
1- Mathématique et physique théorique .....	24
2- Physique théorique et physique expérimentale .....	27
3- Conclusion en suspens .....	30
III- La physique française des années 1920 et 1930 : quelques points de repère .....	30
1- Démographie des physiciens et laboratoires .....	31
2- Les axes de recherches.....	33
3- L'enseignement .....	40
Chapitre II - Louis de Broglie : retour sur le parcours d'un physicien .....	47
I- L'entrée dans la carrière scientifique .....	47
1- La formation.....	47
2- Les premiers travaux de Louis de Broglie .....	49
3- L'hypothèse de la coexistence des ondes et des corpuscules .....	52
II- L'ascension .....	61
1- Diffusion et reconnaissance de ses travaux.....	61
2- Consécration institutionnelles.....	63
III- Portait scientifique et philosophique d'un physicien .....	66
1- La philosophie scientifique de Louis de Broglie .....	67
2- La physique théorique pratiquée par Louis de Broglie .....	78
Chapitre III- La réception de la mécanique quantique en France .....	111
I- Pratique de la mécanique quantique en France (1925-1940) .....	111

1- Poids et usages de la mécanique quantique en France : études comparatives avec la Grande-Bretagne.....	111
2- Une analyse de la production des principaux théoriciens français (1925-1940).....	128
II- Réception philosophique et épistémologique de la mécanique quantique.....	164
1- L'indifférence.....	167
2- La temporisation.....	172
3- Instrumentalisation.....	175
4- Consolidation.....	180
6- À la recherche d'une alternative.....	188
7- Conclusion.....	190
III- Quel rôle a joué Louis de Broglie ?.....	192
1- Le rôle scientifique de Louis de Broglie.....	192
2- Le rôle institutionnel de Louis de Broglie.....	196
3- Louis de Broglie, l'enseignement et la diffusion de la mécanique quantique.....	206
Chapitre IV- Les ruptures de l'après-guerre et la marginalisation d'un physicien.....	213
I- Nouveau paysage de la physique française.....	214
1- Le phénomène international de la <i>big science</i> .....	214
2- Réorganisation des institutions en France.....	215
3- Les nouveaux espaces quantiques.....	222
II- La production des théoriciens d'après-guerre.....	233
2- Analyse des travaux quantiques français.....	238
III- La marginalisation de Louis de Broglie.....	244
1- Hétérodoxies scientifiques.....	244
2- Un nouvel entourage.....	246
3- Quelques considérations politiques.....	249
Conclusion générale.....	251
I- L'ère de Broglienne de la mécanique ondulatoire en France.....	251
II- L'ère « moderne » de la physique quantique.....	253
Annexe 1 : Résultats d'une étude comparative entre le Journal de physique et le Radium et les Proceedings of the Royal Society.....	255
I- Travaux expérimentaux.....	255
II- La physique théorique.....	257
Annexe 2 : La mécanique ondulatoire, l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde et le problème de la création et de l'annihilation des particules.....	259
I- Un procédé heuristique pour établir l'équation de Schrödinger et son application aux équations d'onde relativiste.....	259
II- Les équations relativistes et l'interprétation probabiliste de la mécanique ondulatoire.....	260

III-	Le paradoxe de Klein.....	264
IV-	La théorie des trous de Dirac .....	265
Annexe 3 : La preuve de Von Neumann sur les variables cachées.....		269
I-	La preuve .....	269
II-	Une première réfutation .....	271
III-	Louis de Broglie et le théorème de Von Neumann.....	272
Bibliographie .....		275
I-	Archives et documents d'époque .....	275
III-	Publications non-techniques des physiciens .....	278
IV-	Publications techniques des physiciens .....	281
V-	Entretiens et témoignages .....	287
VI-	Littérature secondaire .....	290

## Résumé

Unique français parmi les fondateurs de la mécanique quantique, Louis de Broglie est une figure majeure de l'histoire de la physique française du XX<sup>ème</sup> siècle. Il devient grâce à son prix Nobel de physique en 1929 le personnage central de la physique théorique française. Dans les récits usuels portant sur la physique française du XX<sup>ème</sup> siècle, la mécanique quantique est décrite comme s'étant très lentement diffusée en France, et il est souvent admis que peu de physiciens de ce pays l'utilisèrent avant la fin de la seconde guerre. De Broglie est souvent désigné comme le grand responsable de cet état de fait et est dépeint comme un représentant type d'une pratique de physique théorique obsolète. De plus, son rôle institutionnel et sa responsabilité dans l'isolationnisme français sont dénoncés.

Le but de ce travail est, premièrement, d'éclairer les modalités de la diffusion de la mécanique quantique en France et le rôle de Louis de Broglie dans ce processus. Ce faisant, mon propos apportera de fortes nuances aux habituels récits portant sur cet aspect de l'histoire de la physique française du XX<sup>ème</sup> siècle. Deuxièmement, je montrerai que l'essor de domaines tels que la physique des particules, la physique du solide et la physique nucléaire après la seconde guerre mondiale introduit un changement dans les pratiques des jeunes théoriciens par rapport aux pratiques qui régnaient autour de Louis de Broglie. Je serai alors en mesure d'expliquer pourquoi l'héritage de Louis de Broglie au sein de la physique française de la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle est si peu revendiqué, tout en évitant de tomber dans le piège des jugements rétrospectifs et péjoratifs.

## Abstract

As the only Frenchman among the founding fathers of quantum mechanics, Louis de Broglie has a great importance in the XXth French physics. With the prestige from the Nobel Prize in 1929, de Broglie became the main characters of the French theoretical physics community since the 30's and great responsibilities on its evolution were entrusted to him. In the usually story of the XXth French physics, quantum mechanics, which is the core of theoretical physics since 1925, is said to have spread slowly in France and French theorists who really used it were few before WWII. This story goes on, saying that de Broglie was the principal guilty of this state of fact. In this story, the discoverer of wave-particle duality of matters becomes a representative of old-fashioned theorists who practice a naive kind of picture-based physics. Furthermore, his institutional action and his responsibility in the isolation of French physics are stigmatized.

The aim of this work is, firstly, to throw light on the modality of the diffusion of quantum mechanics in France and the role of de Broglie in this process, both on the intellectual and the institutional side. Secondly, it will be shown that progress in the area of particle physics, solid state physics and nuclear physics after WWII introduce a shift in the practice of many young theorists relative to the way of practice theoretical physical inside de Broglie's group. We will thus be able to understand why the legacy of Louis de Broglie is not claimed in contemporary French theoretical physics without falling into the trap of a retrospective and pejorative assessment of the career of the most famous French theorist of the XXth century.

# Repères chronologiques

- 1892** : Naissance de Louis de Broglie à Dieppe.
- 1899** : Planck introduit les constantes dites de Planck et de Boltzmann.
- 1905** : Einstein introduit l'hypothèse des quanta de lumière et formule sa théorie de la relativité.
- 1907** : Modèle des vibrations quantiques des solides par Einstein.
- 1909** : Calcul des fluctuations statistiques de l'énergie lumineuse à partir de la loi de Planck par Einstein.
- 1911** : Premier Congrès Solvay.
- 1913** : Modèle quantique de l'atome par Bohr. Louis de Broglie passe sa licence de Physique.
- 1917** : Théorie de l'émission et de l'absorption de la lumière par Einstein.
- 1919** : Louis de Broglie est démobilisé et rejoint le laboratoire de son frère Maurice de Broglie.
- 1922** : Les intérêts de Louis de Broglie basculent vers la structure de la lumière.
- 1923** : Louis de Broglie introduit l'onde de phase associée aux corpuscules.
- 1924** : Louis de Broglie soutient sa thèse de doctorat.
- 1925** : Heisenberg, Born et Jordan posent les bases de la mécanique des matrices.
- 1926** : Schrödinger formule son équation d'onde et pose les bases de la mécanique ondulatoire.
- 1927** : Louis de Broglie formule la théorie de la double solution et celle de l'onde pilote. 5<sup>ème</sup> Conseil Solvay. L'interprétation probabiliste de la mécanique quantique s'impose. Théorie quantique des interactions entre le rayonnement électromagnétique et la matière par Dirac.
- 1928** : Louis de Broglie est nommé maître de conférences à l'Institut Henri Poincaré. Il abandonne sa théorie de la double solution et accepte l'interprétation probabiliste. Equation de Dirac. Théorème de Bloch pour les électrons dans les métaux.
- 1929** : Louis de Broglie obtient le prix Nobel de Physique « pour sa découverte de la nature ondulatoire des électrons ». Formulation canonique de la théorie quantique des champs par Heisenberg et Pauli.
- 1930** : Pauli propose l'existence du neutrino. Brillouin introduit les zones dites de Brillouin.
- 1931** : Début du séminaire Louis de Broglie. Théorie des semi-conducteurs par Wilson.
- 1932** : Premiers travaux sur la mécanique ondulatoire du photon par Louis de Broglie. Découvertes du neutron et du positron. Théorie de Fermi de la désintégration nucléaire  $\beta$ .
- 1933** : Louis de Broglie est nommé Professeur Titulaire de Théories Physiques à la Faculté des Sciences de Paris. Il devient également membre de l'Académie des Sciences. Elsas propose le modèle du noyau en couche.
- 1935** : Yukawa propose l'existence du *mésotron* (plus tard appelé méson) pour expliquer les interactions entre nucléons.
- 1936** : Equations de Proca. Découverte du « méson mu » faussement identifié à la particule de Yukawa.
- 1938** : Découverte de la fission nucléaire par Hahn et Strassmann.
- 1939** : Création du Centre Nationale de la Recherche Scientifique.
- 1942** : Louis de Broglie devient Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences.
- 1945** : Création du Commissariat à l'énergie atomique.
- 1947** : Distinction entre deux types de mésons : le « méson mu » et le « méson pi ». Shelter Island Conference (Electrodynamique quantique). Travaux de Bardeen, Brattain et Shockley sur le transistor.
- 1948-1949** : Formulations de l'électrodynamique quantique par Tomonaga, Feynman, Schwinger et Dyson.



**1950** : Découverte du méson pi neutre, première particule découverte dans un accélérateur.

**1951** : David Bohm redécouvre la théorie de l'onde pilote. Louis de Broglie revient à la théorie de la double solution.

**1954** : Enoncé du théorème CPT (charge, parité, temps).

**1956** : Découverte de la violation de la parité par Madame Wu.

**1957** : Théorie de la supraconductivité par Bardeen, Cooper et Schrieffer.

**1962** : Louis de Broglie prend sa retraite du poste de professeur à l'Institut Henri Poincaré.

**1973** : Fondation Louis de Broglie.

**1975** : Louis de Broglie démissionne de son poste de Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences.

**1987** : Mort de Louis de Broglie.

# Introduction générale

« Le cas de Louis de Broglie pose douloureusement le problème du génie qui fait une très grande découverte, une seule, et qui doit ensuite vivre avec cette découverte. [...] »

Cette découverte peut se formuler en quelques mots : « on sait que le photon qui est une onde, l'onde lumineuse, est aussi une particule. Pourquoi l'électron qui est une particule ne serait-il pas aussi une onde ? » Et voilà, tout est dit, le reste est quelques équations, et cela vaut un prix Nobel, celui de 1929, à trente-sept ans.

Après il faut vivre, découvrir à nouveau, briller, face aux autres génies, les Schrödinger, Heisenberg, Dirac, Pauli, et puis les *poetae minores*, les Born, Jordan, Kramers, et puis les autres. Mais la seconde grande idée ne vient pas, ne viendra jamais, et le physicien qui a eu une idée de génie et n'accepte pas de ne plus avoir que du talent s'enferme dans une quête impossible, se laisse peu à peu circonvenir et chambrer par des flatteurs, des incapables, des illuminés sinon des escrocs ; et voilà la physique théorique française dans les trente-sixième dessous<sup>1</sup> »

C'est en ces termes sans concessions qu'Anatole Abragam (1914-2011), physicien théoricien français, professeur titulaire de la chaire de magnétisme nucléaire au Collège de France entre 1960 et 1985, raconte un récit devenu canonique dans la communauté des physiciens de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle : celui d'une physique française n'acceptant pas les idées neuves, radicales et trop éloignées du bon sens cartésien — comme celles provenant de la relativité et de la mécanique quantique —, celui d'une physique théorique française presque inexistante, endormie, qui se réfugie derrière les gloires d'un passé lointain — celui de Fresnel, de Laplace, de Fourier ou de Poincaré — ou un peu plus récent — celui de Louis de Broglie. Le récit enfin d'une nouvelle génération de physiciens, qui, par les vicissitudes des événements dramatiques de la seconde guerre mondiale, avaient parfaitement « tué le père et la mère [...], bien convaincus [qu'ils avaient] avant tout à compter sur [eux-mêmes] pour faire [leur] chemin et apprendre le métier<sup>2</sup> ».

Dans cette histoire, qui est celle de la physique théorique française du XX<sup>e</sup> siècle, Louis de Broglie occupe une place particulière. Celle d'un physicien qu'un (seul) coup de génie parvient à hisser parmi les pères fondateurs de la mécanique quantique, et à propulser en conséquence dans la peau du « patron » de la physique théorique française. Ce récit se poursuit en signalant que, du fait de sa personnalité et sa vision très particulière (pour ne pas dire étriquée) de la physique théorique, Louis de Broglie devient un obstacle au développement d'une pratique moderne de cette dernière, et à la diffusion même de *sa* propre théorie, la mécanique quantique<sup>3</sup>. C'est donc, toujours selon le récit, essentiellement contre l'héritage de ce physicien qu'un enseignement et une pratique *modernes* de la mécanique quantique se mettent en place après la seconde guerre mondiale, permettant enfin à la France de raccrocher son wagon à celui des locomotives de la physique internationale que sont les pays anglo-saxons. Le découvreur de la « dualité onde-corpuscule » devient ainsi une sorte de symbole d'une physique désormais archaïque, basée sur une recherche de visualisations de processus physiques à jamais inaccessibles à l'aide d'images naïves.

Caricatural, ce récit repose néanmoins sur des faits qui font sens pour les physiciens qui l'ont créé. Il est exact que la physique théorique française, et le développement des théories quantiques en

---

<sup>1</sup> Abragam (1989), p. 65.

<sup>2</sup> Messiah (1982), p. 341.

<sup>3</sup> Jacques Friedel écrit par exemple : « Ce sont d'ailleurs les réserves de de Broglie vis-à-vis des développements de la théorie [quantique] qui ont freiné si longtemps son enseignement en France ». Friedel (1994), p. 172.

particulier, sont, avant la seconde guerre mondiale, quantitativement et qualitativement en retrait par rapport à ce qui se fait pendant la même période notamment en Allemagne, en Grande-Bretagne, aux Etats-Unis, ou encore à Copenhague. Comme il est vrai que le pays parvient partiellement à combler ce retard à partir des années 1950, et à réintégrer les pays en pointe à partir des années 1960 et 1970 sous l'impulsion de groupes de physiciens dynamiques qui se forment autour des « héros » du récit en question. Il est tout aussi avéré enfin qu'à partir de ces années, les nouvelles pratiques théoriques, et en particulier les nouvelles utilisations de la mécanique quantique diffèrent de celles qui avaient cours à la veille de la seconde guerre mondiale, plus particulièrement autour de Louis de Broglie.

Ce récit, qui possède peut-être la fonction de poser, dans l'imaginaire collectif d'une société de physiciens, les fondements d'un ensemble de normes dictant ce que doivent être les objectifs et les bonnes pratiques du théoricien, et qui, en ce sens, ne fait qu'encoder un point de vue tout à fait légitime sur la physique théorique, possède cependant un caractère trop téléologique pour rendre compte de la complexité et des subtilités de l'histoire. En somme, tout se passe comme si *la* bonne pratique de la physique théorique, celle à laquelle la plupart des théoriciens français contemporains adhèrent, coïncidait avec celle aujourd'hui majoritairement en place, et donc comme si toute force tectonique qui retarderait son avènement ou infléchirait son évolution vers d'autres directions devenait *ipso facto* un obstacle au progrès de la discipline.

Au contraire, un des objectifs principaux de ce travail sera d'écrire une histoire qui tentera de rendre compte des différentes pratiques et des différentes attitudes des physiciens en les recontextualisant et en les insérant dans leurs propres logiques. Ce qui relève de la « bonne physique » et de la « physique archaïque » ne sera ainsi pas établi en fonction des progrès ultérieurs de la discipline. Cela ne revient cependant pas à adopter une position épistémologique relativiste : il s'avère que des directions de recherches et des pratiques se révèlent plus fructueuses que d'autres du point de vue même des objectifs que se donnent les différents protagonistes. Mais cela ne peut se juger souvent qu'*a posteriori* (et encore) ou qu'en fonction de la qualité des arguments que fournissent sur le moment les différents protagonistes. Et même si le jugement quant à cette qualité n'est pas arbitraire et ne repose pas uniquement sur les goûts et les humeurs de chacun, il n'existe souvent pas de critères fixes et précis pour trancher entre deux directions à un moment précis de l'histoire des idées.

Mais, plutôt que de juger des écarts entre le récit des physiciens d'après-guerre et la réalité historique, le présent travail prendra ce récit comme un objet historique en tant que tel et tentera de rendre compte de sa genèse. Cela ne veut pas dire qu'il n'apportera pas à cette histoire des corrections et des précisions. Cela veut simplement dire que, prises comme révélatrices de normes différentes de celles qui prévalaient de fait autour du groupe de Louis de Broglie, les interrogations autour de ce récit permettent de mettre en relief les éléments qui entrent en jeu dans la transition entre deux façons de concevoir et de pratiquer la physique théorique, et plus particulièrement la mécanique quantique en France. Tel sera en effet le principal objectif de ce travail. Il s'agira, en particulier, de rendre compte de l'état de l'implantation de la mécanique quantique en France avant la seconde guerre mondiale, du rôle particulier qu'y a joué Louis de Broglie, de la marque que ses options théoriques lui ont apposée, et des raisons pour lesquelles, dans un contexte d'après-guerre tout à fait nouveau, cette empreinte devait être effacée ou du moins marginalisée.

Quelques précisions s'imposent. Par « mécanique quantique », je fais référence à la théorie achevée, telle qu'elle prend initialement forme dans les travaux de Heisenberg, Born, Jordan et Dirac en 1925, de Schrödinger en 1926 et telle qu'on l'enseigne usuellement dans les manuels, que ce soit dans les ouvrages classiques de Dirac et de Von Neumann ou dans les ouvrages plus récents de

Cohen-Tannoudji ou de Messiah, et qui constitue l'ossature conceptuelle et formelle dans le cadre de laquelle se développent les différentes déclinaisons des théories quantiques modernes dans des domaines circonscrits (modèles quantiques des atomes, chimie quantique, physique de la matière condensée, physique des particules...). Sont donc exclues de cette appellation les formes primitives de la théorie telles qu'elles se développent entre 1900 et 1925 (en somme, ce que l'on a appelé « l'ancienne théorie des quanta »). Enfin, la période historique qui sera essentiellement étudiée débute à la période des premiers travaux de Louis de Broglie pour s'achever à sa retraite du poste de professeur à la Faculté des sciences de Paris au début des années 1960.

Les raisons pour lesquelles cette étude prenant place parmi les histoires de la physique théorique en France au XX<sup>e</sup> siècle sera basée sur la mécanique quantique en particulier sont multiples. Premièrement, il s'agit banalement de donner des limites au cadre de l'étude. La physique théorique en tant que telle peut incorporer les travaux relativistes (que ce soit la théorie de la relativité restreinte ou générale) et même les travaux de physique classique (mécanique classique, électromagnétisme, thermodynamique classique ou statistique) mais, en tant que cadre théorique supposé universel et fondamental, c'est surtout la mécanique quantique qui va s'imposer comme la matrice théorique dans laquelle se développe une partie essentielle de ce qu'il est usuel d'appeler la physique théorique moderne. L'autre grand pilier de la physique théorique moderne déjà cité, la relativité, aura effectivement des retombées assez différentes. La relativité restreinte, d'une part, connaîtra ses applications les plus fructueuses dans le cadre même des théories quantiques (que l'on pense à l'atome de Sommerfeld, au rôle heuristique joué par la relativité dans la thèse de Louis de Broglie, à la théorie de l'électron de Dirac puis à la théorie quantique des champs relativistes). La relativité générale, quant à elle, sera pratiquée de manière assez marginale au sein de la communauté des physiciens, ce qui fera dire (selon Alain Connes) à Wolfgang Pauli en 1955 :

« Les physiciens de l'époque ne croient pas que la gravitation et la relativité générale soient de la physique. Ne s'occupent de la relativité que deux sortes de gens, les mathématiciens et les astronomes, aucun physicien normal ne s'occupe de la relativité<sup>4</sup>. »

En outre, notre personnage principal, Louis de Broglie, est avec Erwin Schrödinger l'un des deux fondateurs d'une des versions de la mécanique quantique, la mécanique ondulatoire, cadre dans lequel l'ensemble de son œuvre scientifique se structure. Enfin, la dernière motivation pour se concentrer sur la mécanique quantique est liée à ses caractéristiques et à son statut qui me semblent assez particuliers dans l'histoire de la physique, ce qui permet de mettre en relief quelque chose de fondamental dans l'histoire de la transition entre des pratiques théoriques que je vais décrire dans ce travail et qui est en lien avec la question suivante : comment des groupes de physiciens qui travaillent essentiellement au sein d'un même cadre théorique, celui de la physique quantique, arrivent à développer des cultures scientifiques si différentes ? C'est à cette question que la prochaine partie de cette introduction sera dédiée. Puis je finirai cette introduction en présentant les différentes parties du présent ouvrage, ainsi que la méthodologie et les sources sur lesquelles je me suis appuyé pour les réaliser.

---

<sup>4</sup> Cité dans Connes (2000), p. 87. La relativité générale était cependant une spécialité de certains physiciens gravitant autour de Louis de Broglie à l'Institut Henri Poincaré (par exemple Tonnelat et Vigier). Est-ce déjà le signe que la physique que l'on y pratiquait n'était pas « normale » ?

## I- Spécificités de la mécanique quantique

Les exposés usuels d'histoire de la physique du XX<sup>e</sup> siècle indiquent que la physique a connu une double révolution au début de ce siècle. La première est l'avènement de la théorie de la relativité et la seconde celle de la théorie quantique. Il a été beaucoup question, à juste raison, des bouleversements conceptuels introduits par ces deux théories, et notamment par la mécanique quantique. Ainsi, Jammer indique :

« Never in the history of science has there been a theory which has had such a profound impact on human thinking as quantum mechanics. »<sup>5</sup>.

La mécanique quantique, dans sa double formulation (sous la forme de la mécanique ondulatoire par Louis de Broglie et Erwin Schrödinger et sous la forme de la mécanique matricielle par le groupe de Copenhague-Göttingen), se caractérise par le fait qu'elle ne procède pas d'une redéfinition des concepts qui étaient utilisés en physique classique (comme c'est le cas pour Einstein et sa théorie de la relativité avec les notions de temps, d'espace et de simultanéité), mais d'une tentative explicite de généralisation des formalismes disponibles.

En prenant le modèle de l'optique géométrique et de l'optique ondulatoire, Louis de Broglie et Schrödinger bâtissent une mécanique qui est à la mécanique classique ce que l'optique ondulatoire est à l'optique géométrique, d'où l'appellation de mécanique ondulatoire. Apparaît chez ces deux scientifiques dans un premier temps une nouvelle constitution du monde : chez de Broglie, un monde composé de particules associées à des ondes (ou des ondes à singularités) et chez Schrödinger un monde complètement ondulatoire. Très vite cependant, le formalisme mathématique, qui dans un premier temps se contentait de retranscrire une pensée physique, déborde celle-ci et pose de graves problèmes d'interprétation : que signifie, par exemple, un objet mathématique comme la fonction d'onde définie dans un espace de configuration ? Dans le groupe de Copenhague-Göttingen, les problèmes d'interprétation se posent de manière encore plus aiguë, puisque le point de départ est davantage formel : à partir du principe de correspondance de Bohr, qui consiste à établir une correspondance statistique entre les prévisions de l'électrodynamique classique et les règles quantiques, Heisenberg établit une nouvelle mécanique en conservant la structure formelle de la mécanique classique et en remplaçant les grandeurs classiques par des objets mathématiques qui seront identifiés par Max Born comme étant des matrices.

De ces deux brefs comptes rendus de la construction de la mécanique quantique, on peut constater que la mobilisation des concepts classiques a été indispensable aux créateurs de la mécanique quantique. Louis de Broglie et Schrödinger ont ensuite tenté de faire le chemin inverse, c'est-à-dire de reconsidérer les théories classiques comme celles vers lesquelles tendent les théories formulées dans le cadre de la mécanique ondulatoire lorsque certains paramètres peuvent être négligés. Pour Louis de Broglie, il s'agissait de considérer les particules matérielles de la mécanique classique comme des singularités au sein d'une onde et dont la dynamique obéit aux équations de la mécanique classique lorsque le potentiel quantique peut être ignoré ; pour Schrödinger, il s'agissait de dire que ce que l'on croyait être des corpuscules sont en réalité des trains d'ondes bien localisés. Devant les difficultés rencontrées par ces deux tentatives, ce sont finalement d'autres façons de comprendre la

---

<sup>5</sup> Jammer (1974), préface p. V.

nouvelle théorie, toutes basées sur l'acceptation de l'interprétation probabiliste de Max Born généralisée par la théorie des transformations de Dirac et Jordan, qui l'ont emporté.

Une des plus influentes, celle d'ailleurs dont la majorité des physiciens se revendiquera sans en comprendre forcément toutes les subtilités, est celle de Niels Bohr. Pour Bohr, l'utilisation des concepts classiques est indispensable dans la description des expériences quantiques puisque les résultats de mesures sont constatés par des appareils macroscopiques dont la description relève du langage ordinaire (dont le langage des théories classiques est un raffinement). Toute tentative d'une description d'une expérience en des termes qui seraient purement quantiques est vouée à l'échec car l'utilisation du langage ordinaire est une condition même de la possibilité de communiquer. Loin d'être redéfini comme cas limite par la nouvelle mécanique, le réseau conceptuel de la mécanique classique est donc pour Bohr indispensable à l'utilisation de la nouvelle mécanique.

Que les réflexions épistémologiques de Bohr aient été comprises ou non, l'utilisation de règles de correspondance classique-quantique restera effectif dans le traitement quantique de nombreux problèmes<sup>6</sup>. On peut schématiser dans cette perspective la résolution d'un problème en mécanique quantique de la manière suivante :

- On part d'un problème classique bien défini dans une formulation hamiltonienne.

Ex : l'atome d'Hydrogène dont le Hamiltonien classique est

$$H = \frac{p^2}{2m} - \frac{e^2}{r}$$

- On utilise des recettes formelles de correspondances (faire correspondre les variables classiques à des opérateurs obéissant à des relations de non-commutation) pour définir les opérateurs quantiques qui remplacent les grandeurs classiques.

Ex :  $x \rightarrow x_{op}$ ,  $p \rightarrow p_{op}$  avec  $[x_{op}, p_{op}] = i\hbar / 2\pi$

- Puis enfin on cherche à résoudre l'équation de Schrödinger  $H\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$ .

La mécanique quantique ressemble, dans cette perspective, davantage à un ensemble de recettes mathématiques qu'à une théorie nous imposant une ontologie nouvelle et spécifiée<sup>7</sup>. Nous devons toujours utiliser les concepts classiques (par exemple d'onde et de corpuscule) tout en sachant que leur rôle est heuristique et non pas descriptif, ce qui offre une grande liberté à leur utilisation. Pour prendre un seul exemple dont il sera très largement question dans le cours du travail, les constituants élémentaires de la matière et du rayonnement ne sont pas du tout fixés par la mécanique quantique en tant que telle, et un choix différent peut cependant amener aux mêmes résultats ou à des résultats très proches. On peut ainsi considérer que la matière est constituée de champs, auxquels l'application aveugle des règles quantiques fournit une structure discontinue faisant apparaître la notion de particule

<sup>6</sup> A partir de la seconde partie du XX<sup>e</sup> siècle, dans le domaine de la physique des particules, la fonction heuristique que remplissaient les théories classiques préexistantes est cependant souvent assurée par des considérations de symétrie des lois, si bien qu'il n'est plus nécessaire de passer par ces recettes formelles de correspondance. L'onde de Dirac, pensée comme un champ quantique, n'a par exemple aucun correspondant classique.

<sup>7</sup> Ce qui ne veut pas dire qu'elle ne remet pas en question la possibilité même de prendre au sérieux les ontologies classiques.

en tant que quantum d'excitation (c'est le programme de la théorie quantique des champs). On peut au contraire considérer les particules comme les constituants élémentaires de la matière : l'aspect ondulatoire s'introduira alors par l'intermédiaire du principe de superposition des états. Ces deux points de vue sont équivalents dans un large domaine d'application de la mécanique quantique, même si leur pouvoir heuristique n'est pas forcément le même.

Outre cette multiplicité de points de vue permis, la souplesse de la théorie quantique, ainsi que son lien formel avec la théorie classique permet à son utilisateur une certaine latitude pour choisir de traiter les éléments qu'il souhaite de manière quantique en se contentant d'un traitement classique pour d'autres éléments de son modèle : il s'agit de modèles semi-quantiques.

Cette situation est donc responsable d'une première pluralité des approches quantiques pour aborder un même sujet. Le fait qu'il y ait une multiplicité de façons de modéliser un objet physique explique en partie pourquoi il peut se former des programmes de recherche très différents portant sur un même sujet au sein d'une communauté qui s'accorde pourtant à admettre que la description la plus fondamentale d'un processus physique est la description quantique.

Mais liés à cette neutralité ontologique de la mécanique quantique, il y a également les problèmes d'interprétation qui en découlent. On peut partir de la représentation heuristique que l'on souhaite (un champ ou un système de corpuscules), mais les prescriptions de la mécanique quantique ont pour conséquence que les entités que l'on est censé manipuler ne se comportent pas comme telles : les particules quantiques n'ont finalement que très peu de ressemblance avec les particules classiques ainsi que les champs quantiques avec leurs homologues classiques. Quel qu'il soit, l'évolution du système est encodée dans une fonction d'onde (ou un vecteur d'état) dont il est difficile de démêler le statut. Décrit-elle un processus physique, comme le laisse penser l'apparition de franges d'interférences dans les phénomènes de diffraction, rendant presque palpable la fonction d'onde ? Joue-t-elle le simple rôle d'un catalogue de prédictions probabilistes se référant non pas à quelque chose qui est en train de se passer dans le monde physique, mais simplement aux résultats que l'on pourrait obtenir en fonction de l'expérience que l'on projette de réaliser, comme le laisse penser la subite mise à jour de la fonction d'onde après une mesure ? Ou bien la réponse se situe-t-elle dans un subtil mélange des deux propositions ? La question est légitime, et il semble bien que les physiciens, même ceux se revendiquant de « l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique », diffèrent sur la réponse à y apporter. Mais en réalité, le point de désaccord qui a le plus de conséquences dans notre histoire n'est pas tant la réponse à cette question mais plutôt à celle de savoir si cette question fait partie de celle que doit légitimement se poser le physicien. Car, force est de constater après près de 90 ans d'utilisation que la machinerie de la mécanique quantique fonctionne très bien sans que l'on ait réussi à en dégager une signification ontologique précise. On peut reformuler ainsi le problème avec Franck Laloë : « faut-il travailler avec ou sur la mécanique quantique ? »

« Deux attitudes sont possibles pour le chercheur physicien : prendre la mécanique quantique comme un outil fort efficace et l'utiliser au mieux, ou travailler sur la théorie elle-même. La question est donc : faut-il considérer comme prioritaire un travail de recherche destiné à en éclaircir les fondements<sup>8</sup> ? »

---

<sup>8</sup> Laloë (1984), p. 198.



Or, à cette question il n'y a pas une même réponse qui s'impose à tous. Et c'est pourtant bien le nerf de la guerre, puisqu'à cette question, Louis de Broglie choisira de répondre « oui » quand la grande majorité des physiciens d'après guerre répondront « non » sans aucun état d'âme<sup>9</sup>.

## II- Perspectives et limites de l'étude

L'histoire de la diffusion de la mécanique quantique dans les travaux des physiciens français est une histoire qui a été abordée notamment par Pestre<sup>10</sup> et plus brièvement par Bensaude-Vincent<sup>11</sup>. Comparativement à celle de Pestre, mon étude a une visée plus réduite (je me focalise sur la mécanique quantique quand Pestre étudie l'ensemble de la physique pratiquée en France) mais s'étend sur une période plus longue (environ jusqu'en 1960). Elle est également moins pointue sur le plan institutionnel et socioculturel – bien qu'elle prend également ces aspects en grande considération – mais a pour objectif de prendre davantage en compte les problèmes conceptuels et techniques qui se posent dans l'utilisation de la mécanique quantique. Je n'hésite ici donc pas à rentrer dans le détail technique des théories. Enfin, elle s'articule autour d'un personnage, Louis de Broglie, dont la place occupée au sein de la communauté des théoriciens français, qui passe d'une position centrale pendant les années 1930 et 1940 à une position presque marginale à partir de la fin des années 1950, permet de mettre en exergue les mutations qui sont en jeu dans les pratiques théoriques au cours de cette période. L'étude de Bensaude-Vincent n'est quant à elle pas centrée sur les pratiques des physiciens, mais plutôt sur les obstacles épistémologiques et philosophiques que la mécanique quantique a rencontrés, et les discussions qu'elle a suscitées, y compris chez les philosophes. Je reviens quant à moi dans cette étude sur le thème des discussions philosophiques autour de la mécanique quantique, mais pour conclure que ce n'est quelquefois pas tant les réponses qu'apportent les physiciens aux problèmes d'interprétation de la théorie que la place que ces problèmes occupent dans leur esprit qui est décisive. Autrement dit, l'histoire que j'aborde n'est pas celle d'une acceptation ou d'un rejet purement intellectuel d'une nouvelle théorie mais celle des modalités de son appropriation dans la pratique des chercheurs.

Derrière la place centrale qu'occupe Louis de Broglie dans ce travail, il y a aussi la volonté de mettre en lumière certaines parties de sa carrière qui sont beaucoup moins connues que ses premiers travaux sur la dualité onde-corpuscule. Outre ses travaux, eux aussi relativement connus, sur les problèmes d'interprétation de la mécanique quantique, son attachement à la version « ondulatoire » de la mécanique quantique, même pendant la période à laquelle il adhérait à « l'interprétation orthodoxe » (1928-1951) a suscité divers commentaires assez intéressants pour me donner l'envie d'approfondir la question. Disons pour faire court que deux types de commentaires me sont parvenus. Le premier consiste à dire que cet attachement traduit le fait que pour de Broglie, les ondes de la mécanique ondulatoire sont des ondes réelles. C'est vrai pendant les périodes 1923 à 1928, puis après 1951, mais la réponse à cette question est beaucoup plus subtile pendant la période « orthodoxe ». Derrière ce

---

<sup>9</sup> Pour nuancer cette dernière affirmation, on pourrait me répondre que la littérature portant sur les fondements de la mécanique quantique foisonne après la seconde guerre mondiale. Mais comme nous le verrons, l'état d'esprit dominant est tout de même orienté vers une utilisation pragmatique de la mécanique quantique.

<sup>10</sup> Pestre (1984).

<sup>11</sup> Bensaude-Vincent (1984).



commentaire, il y a également la suspicion du fait que, finalement, l'attachement à la version ondulatoire de la mécanique quantique signale que Louis de Broglie n'a jamais réellement compris la mécanique quantique, et notamment l'équivalence entre les différentes représentations, ce que traduit la théorie des transformations. Autant que je puisse en juger, ceci est faux. L'autre type de commentaires consiste à dire que ces questions ne sont finalement que des questions de vocabulaire, puisque même en Angleterre à cette époque, le terme de *wave mechanics* est largement utilisé. Je montrerai que ce n'est pas exactement vrai, et que la préséance qu'accorde Louis de Broglie à la mécanique ondulatoire a bien des conséquences, même pendant sa période orthodoxe, non seulement pour ses propres travaux mais également pour les physiciens qui gravitent autour de lui à l'Institut Henri Poincaré, mais cela d'une manière plus subtile qu'on pourrait le penser. De là à dire, comme s'interroge Pestre, « que " la mécanique ondulatoire " telle qu'elle est commentée par Louis de Broglie dans les années 20 est plus acceptable par les esprits français<sup>12</sup> », et à affirmer que l'emploi systématique du terme « mécanique ondulatoire » plutôt que celui de « mécanique quantique » traduit quelque chose de fondamentale pour l'ensemble de la communauté des physiciens français, il y a un pas que l'on peut en partie franchir à condition de le faire prudemment.

Ce travail est centré sur les physiciens, et même, dans une large mesure sur les théoriciens. Bien qu'abordée, la question de la diffusion de la mécanique quantique chez les expérimentateurs mériterait d'être plus approfondie qu'elle ne l'est dans le présent travail. La principale constatation que j'ai été en mesure de faire est que les expérimentateurs n'intègrent pas le cadre théorique de la mécanique quantique avant la seconde guerre mondiale autrement que par quelques références épisodiques à la formule de Bohr qui relie la différence d'énergie entre deux niveaux et la fréquence du rayonnement émis, ou encore à la formule de la longueur d'onde de Louis de Broglie. Si la place de la théorie dans le travail des expérimentateurs a donc été peu abordée, je me suis en revanche beaucoup intéressé à la relation inverse, c'est-à-dire la place que les résultats expérimentaux occupaient chez les théoriciens. Les contributions des mathématiciens français aux théories quantiques ne sont cependant pas abordées. Ni ne l'est la question de la réception de la mécanique quantique chez les philosophes français.

### III- Présentation des chapitres

Je commencerai cette étude en décrivant le cadre institutionnel, culturel et scientifique de la physique française dans la période d'entre-deux-guerres (chapitre I), période qui voit Louis de Broglie débiter sa carrière et devenir peu à peu le personnage central de la physique théorique française. Je m'appuierai dans ce chapitre essentiellement sur la littérature secondaire, notamment les travaux de Pestre, que je compléterai par une étude comparative de la production des physiciens français et anglais, l'objectif principal de ce chapitre étant de comprendre les spécificités de la physique française au moment de la réception de la mécanique quantique en France afin de préparer le terrain à une étude des modalités de celle-ci.

Le second chapitre sera quant à lui consacré exclusivement au personnage central de cette étude, Louis de Broglie. Je reviendrai sur sa carrière scientifique en parcourant ses premiers travaux chez son frère Maurice de Broglie, son travail de thèse qui lui vaut en 1929 le prix Nobel de physique,

---

<sup>12</sup> Pestre (1984), pp. 54-55.

et son ascension institutionnelle qui fait de lui, dès les années 1930, et sur le papier du moins, le personnage le plus important de la physique théorique française. Je proposerai ensuite un portrait philosophico-scientifique de ce physicien : il s'agira de comprendre ce qui fonde chez lui le travail de physicien théoricien. Pour ce faire, j'examinerai les nombreux écrits dans lesquels il explicite ses conceptions de la physique théorique et, pour suivre les recommandations d'Einstein — « n'accordez aucun crédit à ce [qu'un théoricien dit sur les principes qui guident sa recherche], mais jugez ce qu'il a produit<sup>13</sup> » —, je compléterai cette étude en cherchant à tirer de ses travaux les invariants de son style de recherche. Je pense montrer avec une telle étude qu'en dégagant certains éléments de sa pensée scientifique profonde, une compréhension des choix scientifiques, qui auront non seulement une importance considérable sur sa carrière mais également quelquefois sur les études quantiques entreprises en France, en découle. Cette étude préparera en même temps une comparaison avec d'autres chercheurs quantistes français, et il s'avèrera que l'influence scientifique de Louis de Broglie sur le reste de la communauté des physiciens sera assez subtile à saisir.

Le troisième chapitre constituera le cœur de ce travail. J'examinerai tout d'abord les modalités de la réception de la mécanique quantique en France, en croisant des approches quantitatives comparatives – qui, malgré leurs très nombreux biais et défauts, permettent néanmoins, à condition de les manier avec prudence, d'objectiver certains aspects – avec une approche plus qualitative des travaux des quantistes français. Nous serons ainsi en mesure de juger assez précisément l'influence scientifique que Louis de Broglie a exercée sur la physique théorique française avant la seconde guerre mondiale. Je compléterai l'étude de cette influence par une mise en perspective de son rôle institutionnel et de son rôle de diffuseur de la théorie quantique en France. Je ferai également dans ce long chapitre une sorte d'aparté : il s'agira d'examiner la question de la réception épistémologique et philosophique de la mécanique quantique par un certain nombre de physiciens français et de poser la question de l'influence de celle-ci sur leur pratique effective de la théorie.

Le quatrième et dernier chapitre sera consacré aux bouleversements que connaît la physique théorique française après la seconde guerre mondiale et à la progressive marginalisation de Louis de Broglie dans cette communauté. Nous aurons ainsi les clefs en main pour comprendre le sens que l'on peut donner au discours d'Abragam avec lequel nous avons commencé cette introduction.

## IV- Sources

Les sources primaires que j'ai utilisées se déclinent essentiellement en trois catégories. Tout d'abord, les sources d'archives (correspondance, manuscrits, rapports, comptes-rendus, documents administratifs...) auxquelles j'ai pu avoir accès, notamment au service d'Archives de l'Académie des sciences de Paris, à l'Institut Henri Poincaré, aux Archives Nationales, ainsi que quelques documents d'archives personnelles d'Alexandre Proca et de Gérard Petiau grâce à des membres de leur famille respective. Les journaux de l'époque, et particulièrement le *Journal de Physique et le Radium*, ainsi que plus généralement, les publications des physiciens de la période étudiée ont été les matériaux sur lesquels reposent une grande partie de l'étude des aspects purement scientifiques et épistémologiques. Enfin, même s'ils s'avèrent toujours délicats à manier, les témoignages des acteurs ou des témoins historiques constituent une source d'information souvent irremplaçable. J'ai donc eu recours à ceux-ci.

---

<sup>13</sup> Einstein (1933), p. 129

J'ai notamment rencontré Georges Lochak, Jacques Friedel, Jean-Louis Basdevant, Maurice Kéleman, André Martin, Cécile Morette-Dewitt, Maurice Lévy, François Lurçat ainsi que Pierre Petiau, fils de Gérard Petiau. D'autres entretiens très intéressants sont disponibles : je pense notamment aux entretiens déposés à l'*American Institute of Physics* dans le cadre du projet *Archive for the History of Quantum Physics*, ainsi que quelques interviews plus tardives. Grâce à ces entretiens, on peut avoir accès aux précieux témoignages de quelques témoins et acteurs de la physique française d'avant guerre, témoins devenus aujourd'hui extrêmement rares. Toujours dans le même registre, un certain nombre de physiciens français ont publié leur mémoire : nous retrouvons parmi ceux-ci quelques figures clefs de la physique des périodes étudiées, comme Yves Rocard, Louis Néel, Louis Leprince-Ringuet, Anatole Abragam, Jacques Friedel ou encore Georges Lochak.

Concernant les sources secondaires, les travaux de Dominique Pestre sur l'histoire institutionnelle et socioculturelle de la physique française ainsi que les travaux et les interviews de Jean-François Picard pour l'histoire du CNRS ont été précieux. Quelques comparaisons avec la physique des pays étrangers ont également nécessité la mobilisation des travaux de quelques historiens des sciences : je pense notamment, sans être exhaustif, à Sam Schweber pour la physique théorique américaine, Christa Jungnickel et Russell McCormmach pour la physique allemande avant 1925 et Jaume Navarro pour la physique anglaise. Les biographies de quelques protagonistes importants ont également été mobilisées : citons, par exemple, celle bien sûr de Louis de Broglie par George Lochak, de Léon Brillouin par Rémy Mosseri, de Paul Langevin par Bernadette Bensaude-Vincent, ou encore de Frédéric Joliot par Michel Pinault. L'ouvrage de Helge Kragh (1999) a été utile pour avoir une vue d'ensemble sur l'histoire de la physique du XX<sup>e</sup> siècle, et des histoires plus spécialisées pour ce qui relève plus spécifiquement de l'évolution des différents champs de recherche qui nous préoccupent : je pense ici aux travaux de Mehra et Rechenberg, Olivier Darrigol, Sam Schweber, Abraham Pais, ou encore Spencer Weart.

# Chapitre I. Panorama du paysage institutionnel et socioculturel de la physique française des années de l'entre-deux guerres

L'objectif de ce chapitre est de décrire à grand traits les caractères spécifiques de la physique française au moment de l'accueil de la mécanique quantique, et notamment la place qu'y occupe la physique théorique. J'en poserai le cadre scientifique, institutionnel et socioculturel général, ce qui permettra une estimation des « forces en présence » sur lesquelles Louis de Broglie, en tant que *leader* de la physique théorique du pays, pouvait exercer une influence. Après avoir rappelé les mécanismes historiques qui fixent la structuration de la physique française au début du siècle, je chercherai à en déterminer les spécificités au moment puis à la suite de l'apparition des théories physiques modernes. Pour ce faire, je m'aiderai de comparaisons entre la situation française et quelques pays étrangers. Les données brutes sur lesquelles je m'appuierai proviennent notamment de l'ouvrage de Dominique Pestre sur la physique en France entre les deux guerres<sup>14</sup> ainsi que de quelques analyses personnelles qui les complètent. Une discussion des principales thèses émises dans le livre de Pestre qui concernent la (non-)réception des théories physiques modernes en France sera entreprise.

## I- Une brève histoire des institutions scientifiques françaises jusqu'aux années 1920

### 1- À l'origine de la science française institutionnalisée

On peut trouver une première ébauche de formation d'une communauté de scientifiques en France dans les réseaux informels de savants qui se forment autour du Père Mersenne au XVII<sup>e</sup> siècle. Ces groupes sont cependant trop dépendants du mécénat des seigneurs pour pouvoir se stabiliser. La volonté croissante de la monarchie de contrôler les nouvelles découvertes scientifiques et de concurrencer les universités restées liées à l'Eglise catholique se traduit par la création de l'Académie Royale des sciences en 1666 par Colbert, suivie de la création, l'année suivante, de l'Observatoire de Paris. Jusqu'en 1785, la couronne se montre assez dirigiste, en se réservant la nomination des membres de l'Académie, en utilisant les savants en tant qu'experts au service de l'état et en orientant les activités par le lancement de concours pour des travaux d'utilité publique. Le financement de la science devient cependant insuffisant, essentiellement à cause du choix de son utilisation. En effet, une très grande part de celui-ci restera, jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle, consacré à la récompense de travaux déjà effectués à travers le système de prix, plutôt que dans l'encouragement aux nouvelles recherches et à l'éducation scientifique – qui est particulièrement défailante jusqu'au début du XIX<sup>e</sup> siècle puisque seul le Collège royal dispense un enseignement scientifique non religieux<sup>15</sup>.

---

<sup>14</sup> Pestre (1984).

<sup>15</sup> Voir par exemple Grimoult (2008).

La Révolution française et le Premier empire sont marqués par un réaménagement institutionnel important de l'enseignement français, avec notamment, concernant l'éducation scientifique, la création des grandes écoles (Polytechnique et l'Ecole Normale) et la réforme napoléonienne des universités. Pour autant, c'est l'enseignement scientifique et non pas la recherche en tant que telle qui est visé par ces réformes<sup>16</sup>.

## 2- L'école Polytechnique

Issue de l'Ecole des ponts et chaussées, l'Ecole Polytechnique est fondée – sous le nom d'« Ecole centrale des travaux publics » - par décret du Comité de salut public le 11 mars 1794 afin de pallier la défaillance de l'Ecole du génie de Mézières<sup>17</sup> dans la tâche d'assurer la formation théorique des futurs ingénieurs civils et militaires. Se détachant progressivement de l'administration de l'instruction publique, puis de l'Université Napoléonienne après 1808, l'Ecole rentre sous la tutelle du ministère de la Guerre en 1830.

Gaspard Monge est le premier grand architecte de la formation polytechnicienne. Son ambition initiale pour l'école est grande : il s'agit de donner un enseignement scientifique et technique complet, comprenant à la fois les savoirs théoriques de base et une vaste maîtrise de leurs applications. Les enseignements sont donnés par les plus grands savants de l'époque : Monge lui-même, Lagrange, Berthollet...

Cependant, l'ambition de ce projet se restreint assez rapidement avec la création des écoles d'application, principaux débouchés des étudiants de Polytechnique. En effet, ces dernières vont progressivement s'accaparer les cours d'applications, laissant à l'école Polytechnique le seul soin de l'enseignement théorique général. À l'origine de ce phénomène, la création en 1795 des examens d'admission aux écoles d'applications, qui fusionneront à partir de 1806 en un seul examen pour toutes ces écoles. Sous l'influence de Laplace et Bossut, le contenu de celui-ci va se concentrer sur les mathématiques, exerçant une forte pression en ce sens sur tout le programme d'enseignement de l'école. Les mathématiques seront également le principal critère de sélection au concours d'entrée de l'école. L'excellence mathématique de la formation polytechnicienne sera une de ses principales caractéristiques tout au long de son histoire. Mais une telle hégémonie se poursuivra longtemps au détriment des autres disciplines, et notamment de la physique.

Bien que la finalité naturelle de l'enseignement polytechnicien soit de former les hauts fonctionnaires et les officiers supérieurs, l'Ecole alimente tout au cours du XIXe siècle également l'industrie privée et la recherche. Parmi les savants prestigieux qui y ont été formés, on retrouve par exemple Biot, Arago, Dulong, Coriolis ou encore Poincaré. Cependant, à partir du milieu des années 1880, la part des vocations scientifiques diminue, ce qui laisse les normaliens dominer la recherche française.

## 3- L'École normale supérieure et les Facultés des sciences

---

<sup>16</sup> Voir Ben-David (1970).

<sup>17</sup> Belhoste (1994).

Napoléon organise par le décret du 17 Mars 1808 l'Université impériale. L'objectif est d'asseoir un monopole étatique sur l'enseignement secondaire après l'échec de la réforme de l'instruction publique de 1802<sup>18</sup> : les établissements d'éducation publique créés à cette occasion avaient en effet souffert de la concurrence du privé. L'Université impériale comprend l'Ecole normale supérieure, la Faculté de sciences et des lettres et les collèges et lycées. Elle délivre quatre grades : le baccalauréat, la licence, le doctorat et l'agrégation.

L'École normale avait initialement été créée en 1795 afin de former les instituteurs de la République, mais son fonctionnement fut éphémère. En 1808 donc, Napoléon recrée cette école en l'intégrant à l'Université impériale dans l'objectif de former les professeurs des lycées. L'enseignement des normaliens se déroule à la Faculté des sciences de Paris (Sorbonne). L'ENS recrute sur concours dans les mêmes écoles de préparation que Polytechnique, et l'accent de l'examen d'entrée est également mis sur les mathématiques. Le concours d'agrégation, qui ouvre les postes de professeur dans le secondaire, est d'une importance capitale pour l'ENS. À partir de 1814, tout normalien ayant obtenu une licence acquiert le titre d'agrégé ; à partir de 1830, les normaliens doivent concourir à l'agrégation à la fin de leurs trois années d'études<sup>19</sup>. Ils peuvent également valider un doctorat en vue d'obtenir un professorat de Faculté. Ce dernier recueille cependant moins de succès que l'agrégation, les normaliens préférant s'assurer un poste dans un lycée parisien plutôt que dans une faculté de province.

Institution révolutionnaire, l'ENS est regardée par le pouvoir avec une certaine méfiance pendant la restauration. La seconde partie du XIXe siècle voit cependant l'ENS devenir le principal producteur de scientifiques en France. La recherche y prend une place significative, avec notamment la fondation du laboratoire de chimie d'Henri Sainte-Claire Deville en 1851 et l'action de Louis Pasteur à partir de 1857. Celui-ci mit notamment beaucoup de soin pour attirer les plus brillants étudiants français - dont la destination privilégiée était alors l'Ecole Polytechnique - vers l'ENS. Le nombre de carrières scientifiques chez les normaliens augmente considérablement au cours de ce demi-siècle : d'après Zwerling<sup>20</sup>, 16% des personnes formées (ce qui correspond à 12 personnes) dans la section science de l'ENS épousaient une carrière de scientifique entre 1808 et 1821 alors qu'ils sont 26% (qui correspondent alors à 98 personnes) à le faire entre 1880 et 1893. L'ENS fournira la majorité des *leaders* de la physique française des années 1920 et 1930 : Langevin, Weiss, Cotton, Borel, Maurain ou encore Perrin.

Les Facultés des sciences ont pour principales missions d'organiser et de corriger les diplômes de baccalauréat, de licence – qui ouvre les portes de l'enseignement dans les lycées et collèges - et de doctorat – qui permet d'enseigner dans les Facultés. À partir de 1896, une distinction entre trois types de licences – ès sciences mathématiques, ès sciences physiques et ès sciences naturelles - est établie. Une licence s'obtient alors par l'obtention de trois *certificats d'études supérieurs*<sup>21</sup>. Le doctorat s'obtient par la soutenance d'une ou deux thèses spécialisées également dans l'une des trois rubriques précédentes. Cela aura pour conséquence de partager les thèses de physique entre la rubrique ès mathématique (les thèses de physique mathématique) et la rubrique ès sciences physiques (les thèses de physique expérimentale). Dans sa thèse, Joao Principe récapitule les travaux de Shinn, Hulin et Davis portant sur les thèses de doctorat du XIXe siècle. Ceux-ci montrent la faiblesse du nombre de

---

<sup>18</sup> Savoie (2009).

<sup>19</sup> Principe (2008), p. 21.

<sup>20</sup> Zwerling (1976), p. 103.

<sup>21</sup> Paul (1985).



thèses de physique mathématique par rapport à celui des thèses de physique expérimentale, la médiocre qualité de ces dernières – mises à part quelques thèses qui sont écrites à la fin du XIXe siècle, et qui sont l'œuvre notamment de Marcel Brillouin, Paul Langevin et Jean Perrin - et la bonne qualité des thèses de mathématiques. Joao Principe conclut notamment :

« En résumé, l'analyse des doctorats scientifiques met en évidence certaines caractéristiques de la recherche et de l'enseignement supérieur, stables pendant la seconde moitié du XIXe siècle : l'hégémonie parisienne, l'importance des grandes écoles et surtout l'ENS et le prestige des mathématiques et des disciplines classiques (en particulier, l'Astronomie et l'optique) »<sup>22</sup>.

Ces tendances fixées au XIXe siècle se perpétueront encore très largement pendant l'entre-deux guerres.

Les chaires de Faculté des sciences, qui sont créées en 1809, sont partagées également entre ces trois rubriques : sciences mathématiques, sciences physiques et sciences naturelles. Le gouvernement gère les programmes et les nominations pour les différents postes. Or, il n'accordera durant une très grande partie du XIXe siècle que très peu d'importance à la recherche. Les critères de sélection dans les nominations des postes se réfèrent d'avantage à l'expérience d'enseignant qu'à celle de chercheur. Ainsi, à l'exception de Paris, une grande part du personnel enseignant des Facultés était issue de l'enseignement secondaire. Le résultat est que la recherche se développera très peu dans les Facultés des sciences et qu'elle restera le privilège des Grandes Ecoles.

L'avènement de la troisième république, qui s'accompagne d'une conscience accrue de l'importance de la recherche, provoque quelques changements dans le rôle et le poids attribués à l'Université dans celle-ci. Bien que les raisons de telles réformes soient largement à rechercher du côté du traumatisme causé par la défaite contre l'Allemagne – souvent attribuée à la supériorité scientifique de celle-ci - et de l'idéologie scientiste qui imprégnait la troisième république, on peut faire remonter leur origine à l'action de Victor Duruy, ministre de l'éducation, à la fin du Second Empire. Souffrant de la comparaison avec les universités allemandes, américaines ou anglaises, et du fait qu'une grande part des forces vives est détournée par l'hégémonie des grandes écoles, la France se donne alors les moyens de renforcer la recherche universitaire. L'École Pratique des Hautes Etudes est créée par décret impérial le 31 juillet 1868. Ses principaux rôles sont de produire de nouveaux enseignants universitaires, de former aux pratiques de recherche de laboratoire et de distribuer des fonds pour la formation et la recherche. Un plan d'extension de la Sorbonne, du Muséum et de la Faculté de médecine de Paris accompagne ce processus, permettant la création des laboratoires à vocation de recherche et d'enseignement<sup>23</sup>. Mais c'est surtout lors du dernier quart du siècle, sous la direction des ministres de l'éducation supérieur Alfred Dumont puis Louis Liard, que l'Université va connaître une considérable expansion : le nombre de professeur fait plus que doubler en France entre 1880 et 1909 où il atteint un nombre qui restera stable jusqu'aux années 1930<sup>24</sup>. De nombreux laboratoires de recherche industrielle sont créés dans des facultés de Province. En 1897, les facultés d'une même ville sont regroupées en universités autonomes. Treize écoles d'ingénieurs, parmi lesquelles l'Ecole supérieure de physique et chimie industrielle sont créées entre 1880 et 1900.

Pour autant, le système universitaire français ne parvient toujours pas à concurrencer le système allemand. La vocation des Facultés reste avant tout l'enseignement plutôt que la recherche. La

---

<sup>22</sup> Principe (2008), p. 25.

<sup>23</sup> Paul (1985).

<sup>24</sup> Ben-David (1970), p. 177

stabilité du découpage en différentes disciplines des chaires et des enseignements ne permet pas une adaptation rapide aux changements scientifiques et le système d'élection des chaires, dans lequel participent aussi bien les spécialistes que les non-spécialistes, ne favorise pas forcément la nomination des personnes les plus compétentes, chose importante lorsque la médiocrité d'un titulaire de chaire peut condamner le développement d'une discipline au sein d'une université.

#### 4- La thèse du déclin

D'après Harry W. Paul, le financement de la recherche ne souffre pas tant d'un manque en quantité que du choix de sa destination, orientée souvent vers les récompenses de travaux accomplis plutôt que vers l'encouragement à des nouvelles recherches. En 1902, le sénateur Jean Audiffred propose le lancement de la Caisse des recherches scientifiques, destinée à permettre le financement de la recherche. Ce dispositif s'avère cependant insuffisant.

La création d'instituts intégralement dédiés à la recherche scientifique va toutefois permettre à quelques travaux à la pointe de la science internationale de pouvoir se développer en France. C'est tout d'abord l'Institut Pasteur qui est créé en 1888. Ce modèle d'Institut qui va grandement inspirer l'Allemagne et les Etats-Unis ne fera cependant souche en France qu'avec les donations privées venues des fondations américaines : la fondation Carnegie qui participe à la création de l'Institut du Radium (1910) ou encore Rockefeller qui finance l'Institut Henri Poincaré (1928). Mais ces instituts ne masquent pas le fait que la situation institutionnelle globale de la science française n'est, au début du XX<sup>e</sup> siècle, pas satisfaisante par rapport à ses correspondantes allemandes, anglaises ou américaines.

Cet état de fait pose la question de la validité de la thèse du déclin de la science française à partir des années 1840, thèse proposée notamment par Ben-David dans les années 1970<sup>25</sup>. Celui-ci soutient qu'après avoir occupé la place de centre incontesté de la science européenne durant le premier tiers du XIX<sup>e</sup> siècle, à une époque où la professionnalisation et l'institutionnalisation de la science n'avaient atteint un niveau élevé dans aucun pays, la France n'avait pas pu s'adapter à la montée en puissance de la science allemande dans la seconde partie du XIX<sup>e</sup> siècle et avait perdu son rôle de puissance scientifique de premier plan. La principale raison invoquée pour expliquer ce déclin est un excès de centralisation. Selon cette vue, le contrôle strict des écoles et des institutions scientifiques par l'Etat aurait pour incidence une trop grande rigidité dans l'organisation de la science. Les diverses institutions se voient confier des objectifs bien précis qu'il est difficile de redéfinir lorsque le besoin d'adaptation se fait sentir. Ces besoins seront alors assurés par la création de nouvelles structures plutôt que par la réforme des anciennes (l'exemple donné par Ben-David est la création de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes). Peut-on voir le signe d'une constance, lorsque, en 1982, Albert Messiah déclare :

« La France, dit-on, est le pays de la révolution ; c'est, je pense, l'un des plus conservateurs. On n'y supprime jamais rien ; les diverses institutions y ont une pérennité étonnante et, si l'on estime que certaines ne font pas l'affaire, on en crée de nouvelles. Cela donne une sorte de patchwork.<sup>26</sup> »

---

<sup>25</sup> Ben-David (1970).

<sup>26</sup> Messiah (1982), p. 341.



Alors que dans des pays comme l'Allemagne ou l'Angleterre, une innovation au sein d'une institution sera suivie de l'appropriation de celle-ci par les organisations concurrentes - favorisant ainsi une plus grande émulation - la répartition trop stricte des rôles en France aura pour conséquence l'isolationnisme et l'individualisme des différents acteurs scientifiques. Alors que le travail d'équipe, l'ouverture et la concurrence sont de mise dans les autres principaux pays scientifiques, les scientifiques français cultivent dans la solitude leurs propres domaines de recherche et n'éprouvent pas nécessairement le besoin de s'adapter aux nouveautés.

La thèse du déclin a déjà été largement discutée et critiquée dans la littérature<sup>27</sup>, et l'objet de cette discussion n'est pas de prendre part au débat mais d'aborder certains aspects qui seront pertinents pour notre propre étude. L'important ici est de souligner que, quel que soit le degré de validité de l'explication en termes de centralisation, la description faite ci-dessus correspond effectivement à certains traits réels caractéristiques de la physique française pendant la période qui va nous intéresser dans cette partie de l'étude. En effet, l'inertie des structures de recherche et l'isolationnisme sont encore des traits incontestables de la physique française pendant la période que nous allons étudier, et ont sans doute des conséquences sur la qualité de la diffusion de la mécanique quantique en France.

## **II- Spécificités de la physique théorique en France avant l'émergence de la mécanique quantique**

La physique théorique est un des exemples privilégiés qui servent à illustrer la thèse du déclin français. De Lagrange à Fresnel, en passant par Laplace, la France apporte une contribution fondamentale aux théories physiques pendant le premier tiers du XIX<sup>e</sup> siècle. Pourtant, les innovations théoriques qui bouleversent la physique à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (électromagnétisme, électrodynamique, physique statistique) et le début du XX<sup>e</sup> (relativité, physique des quanta) accorderont une place dérisoire aux contributions françaises. La France semble alors coupée des grands courants théoriques qui se constituent dans le nord de l'Europe, notamment dans les pays germaniques.

L'avènement de la physique théorique en tant que discipline autonome est un phénomène qui apparaît progressivement en Europe à la fin du XIX<sup>e</sup> et au début du XX<sup>e</sup> siècle. Jusqu'alors, les physiciens qui produisaient de la théorie partageaient cette activité avec celle de mathématicien (Lagrange, Laplace, Hamilton...) ou d'expérimentateur (Fresnel, Ampère, Coulomb...) quand ce n'était pas les deux. C'est à sa difficile genèse en France, et cette tension entre mathématique et expérience que la présente section est consacrée.

### **1- Mathématique et physique théorique**

En France, les domaines de la physique qui avaient atteint le plus haut degré de raffinement théorique au XIX<sup>e</sup> siècle — notamment la mécanique ou l'astronomie — étaient souvent institutionnellement rattachés aux mathématiques. Nous avons vu par exemple précédemment<sup>28</sup> que les thèses de physique théorique (ou mathématique) étaient soutenues sous la rubrique *ès mathématique*

---

<sup>27</sup> Voir par exemple Shinn (1979).

<sup>28</sup> Voir plus haut (I -3).

alors que les thèses de physique concernaient, à de très rares exceptions près (quelques parties de la thèse de Marcel Brillouin par exemple), uniquement des travaux expérimentaux. Atten donne un exemple de la logique qui semblait sous-jacente à cet écartèlement de la physique, en s'appuyant sur des passages des cours professés à l'Ecole Polytechnique au début de la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle :

« Jamin, dans l'introduction publiée en 1858 de son Cours de physique de l'Ecole Polytechnique, propose le découpage suivant : les physiciens établissent les lois et les questions théoriques sont renvoyées aux traités de physique mathématique [...]

Une fois les lois physiques établies expérimentalement, « il n'y a plus qu'à demander aux mathématiques le développement rationnel de toutes leurs conséquences ». On peut alors, assure Jamin, « abandonner la marche expérimentale qui a servi à les découvrir et, en changeant de méthode, il n'y aurait plus qu'à descendre des principes à leurs conséquences ». Autrement dit, la théorie physique devient purement déductive, c'est-à-dire un des domaines des mathématiques. Les exemples donnés sont l'astronomie et la mécanique rationnelle<sup>29</sup>. »

Pestre<sup>30</sup> défend la thèse selon laquelle ce rattachement de la théorie physique aux mathématiques est une caractéristique majeure de la physique théorique française dans le tournant du XX<sup>e</sup> siècle, caractéristique qui se prolonge même jusqu'à la seconde guerre mondiale, et qui a des fâcheuses incidences sur l'adaptation des physiciens français à l'évolution alors si rapide des théories physiques. Ainsi, pour Pestre, il existe en France au début du XX<sup>e</sup> siècle essentiellement deux groupes de personnes qui sont, en principe, susceptibles de s'occuper de théories physiques : d'une part des physiciens et d'autre part des mathématiciens. Les premiers adoptent souvent une attitude de méfiance vis-à-vis de la théorie et envisagent leur métier de physicien comme une activité purement expérimentale. Quelques physiciens s'intéressent vivement aux théories nouvelles (les figures les plus marquantes sont Paul Langevin et Edmond Bauer) mais ils restent des exceptions. Les seconds occupent généralement tous les postes dédiés à l'enseignement de la physique théorique (Poincaré, Marcel Brillouin, Boussinesq, Borel, Picard et d'autres). Leurs préoccupations et leurs pratiques théoriques, avance Pestre, sont souvent très différentes de celles des physiciens. Pestre insiste notamment sur quatre points :

-Lorsqu'il aborde un problème physique, le premier souci du mathématicien est souvent le perfectionnement de l'outil mathématique permettant sa résolution. Autrement dit, l'important n'est pas tant de résoudre tel problème physique particulier que d'étendre les méthodes mathématiques pouvant servir à une classe générale de problèmes.

-Cet état de fait a souvent pour conséquence un décalage dans les choix des sujets du mathématicien par rapport à l'actualité la plus pressante de la physique. Le physicien mathématicien ne privilégiera pas nécessairement l'étude théorique des résultats les plus nouveaux et les plus problématiques qu'obtiennent les expérimentateurs.

-Le mathématicien cherchera la rigueur et la cohérence d'un formalisme. Il sera peu soucieux de modélisations locales, mais privilégiera au contraire une approche systématique des problèmes en partant des premiers principes. Lorsque ceux-ci ne sont pas établis sur des bases fermes (comme c'est le cas par exemple pour l'ancienne théorie des quanta avant l'avènement de la mécanique quantique), il préférera ne pas se préoccuper du problème en question et évitera de formuler des hypothèses particulières et provisoires.

---

<sup>29</sup> Atten (1995), pp. 224-225.

<sup>30</sup> Pestre (1984), pp. 108-119.

-Le mathématicien privilégie le formalisme et recourt moins que le physicien à l'image et à l'analogie.

Cette façon de concevoir la théorie physique n'est pas sans ressemblance avec celle résumée plus haut par Atten pour le cas de Jamin, dans le sens où la théorie, telle que pratiquée par le mathématicien, serait une science essentiellement déductive. Ces différences d'approches justifient selon Pestre le recours à deux appellations différentes : lorsqu'ils s'occupent de théorie, les mathématiciens font de la *physique mathématique* alors que les physiciens font de la *physique théorique*. Ces deux appellations coexistaient déjà à cette époque ; on peut trouver en 1912 chez Emile Borel une ébauche de théorisation selon des critères qui recourent ceux de Pestre : le mathématicien utilise les analogies physiques mais se concentre principalement sur la perfection mathématique, tandis que le physicien utilise les mathématiques comme un outil pour appréhender les phénomènes physiques<sup>31</sup>. Quelques années plus tard, le mathématicien suisse Gustave Juvet propose également une telle classification :

« [La physique théorique], qui a pour but de coordonner et de prévoir les progrès de la physique expérimentale est d'une extraordinaire vitalité et sa fécondité a été considérable depuis trente ans. Mais elle ne saurait détrôner la physique mathématique dont la tâche doit être l'étude de la structure interne et de la cohérence des nouvelles théories si nombreuses et si riches<sup>32</sup>. »

Mais il est alors parfois aventureux de classer ainsi aussi nettement les individus que Pestre range du côté des physiciens mathématiciens (Marcel Brillouin avait par exemple une démarche souvent très modélisatrice, comme le montre sa tentative de rendre compte de la quantification des trajectoires des électrons au sein de l'atome en 1919). Le fait que la physique mathématique soit hégémonique par rapport à la physique théorique en France au tournant du XX<sup>e</sup> siècle n'aurait pas été sans conséquence, toujours selon Pestre, dans le manque de participation des Français dans le développement des nouvelles théories physiques et dans le retard avec lequel ils se les sont appropriées<sup>33</sup>.

Joao Principe, qui a étudié la réception de la physique statistique en France, conteste pourtant la pertinence de l'analyse de Pestre pour expliquer le retard de la physique française. Selon lui, non seulement les deux tendances sont souvent présentes chez le même individu, mais il est de plus difficile de les distinguer si nettement. D'une part, les mathématiques ne sont pas une science aussi purement déductive. D'autre part, certaines des avancées théoriques principales chez Maxwell et Boltzmann relèvent essentiellement d'une attitude abstraite et mathématisée, ce qui montre que cette attitude n'est pas forcément synonyme de stagnation. Discutant des travaux d'Atten qui reprend la thèse de Pestre dans l'étude des développements des théories en France à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, Principe conclut :

« Le bien fondé de cette distinction [entre physiciens théoriciens et physiciens mathématiciens] semble souvent douteux si l'on examine l'œuvre des savants concernés. Atten semble s'être souvent contenté de classer les savants selon leur appartenance institutionnelle et selon les périodiques dans lesquels ils publient<sup>34</sup>. »

---

<sup>31</sup> Borel (1972).

<sup>32</sup> Juvet (1934).

<sup>33</sup> Pestre (1984).

<sup>34</sup> Principe (2008). p. 73.

Il reste vrai que lorsque l'on observe les attitudes des physiciens et des mathématiciens concernant les nouvelles théories physiques du vingtième siècle, celles-ci diffèrent, selon qu'il s'agisse de la relativité ou de la théorie des quanta. Les débats constructifs qui ont eu lieu lors de la venue d'Einstein à Paris en 1922 ont concerné davantage les mathématiciens — Painlevé, Borel, Hadamard, Brillouin (Marcel) —, mais aussi les philosophes, que les physiciens, à l'exception notable, bien sûr, de Paul Langevin. Einstein n'a par exemple pas été reçu par la Société Française de Physique<sup>35</sup>. Au contraire, les mathématiciens se sont très peu souciés de l'ancienne théorie des quanta alors que les physiciens l'ont intégré — même si cela a été tardif - à leurs outils de recherche. Cela peut accréditer la thèse de Pestre qui explique la réception de la relativité par ces deux groupes de la manière suivante :

« La méfiance des expérimentalistes – sinon leur refus courtois ou brutal – peut se comprendre par le fait que la théorie de la relativité restreinte commande un complexe expérimental fort réduit. [...] Pour les mathématiciens, le problème est différent : il est vrai que l'attachement à la mécanique classique comme système complet et clos, comme modèle parfait, peut engendrer la méfiance vis-à-vis de l'intruse. Pourtant elle est au cœur des débats de ces « mécaniciens », on la connaît et elle fascine par ce côté formel et abstrait qui horrifie les expérimentalistes<sup>36</sup>. »

À l'inverse, selon cette vue, l'ancienne théorie des quanta, qui constitue davantage un ensemble de règles phénoménologiques qu'un corps de doctrine formellement bien établi intéresse nécessairement davantage les physiciens que les mathématiciens.

## 2- Physique théorique et physique expérimentale

La thèse de Pestre me paraît donc être intéressante et nous aurons à la confronter à la période de réception de la mécanique quantique. Mais je peux déjà indiquer que la mobilisation d'autres catégories permettra de suivre plus finement ce processus. Cette thèse peut d'ores et déjà être nuancée. Par exemple, les débats sur la relativité restreinte auxquels prennent part les mathématiciens lors de la venue d'Einstein ne se cantonnent nullement au caractère formel de la théorie mais insistent parfois sur des aspects purement physiques (le paradoxe des jumeaux par exemple). Il ne s'agit peut-être pas tant d'une question de différence d'état d'esprit entre le physicien théoricien et le physicien mathématicien que d'une différence dans les relations institutionnelles avec les expérimentateurs. Parce qu'ils ne côtoient pas quotidiennement les expérimentateurs et qu'ils ne publient pas forcément dans les mêmes journaux, le centre de préoccupation des mathématiciens français ne peut pas se situer autour des nouvelles données expérimentales. En retour, le travail expérimental est privé d'un guide essentiel dans l'exploration de nouveaux sujets. Cette situation rend donc plus difficile la mutuelle fertilisation de l'expérience et de la théorie comparativement aux autres grands pays scientifiques (notamment certains centres allemands très actifs comme Göttingen ou Munich, et les universités américaines qui deviendront un modèle après la seconde guerre mondiale).

La situation institutionnelle est ici complètement différente de celle qui se met en place doucement en Allemagne depuis les années 1870 sous l'impulsion d'Hermann Von Helmholtz et Gustave Kirchhoff. Comme en France, les physiciens qui s'occupent de théorie subissent une certaine tension entre les mathématiques et la physique. Cela se traduit dans un premier temps par une

---

<sup>35</sup> Biezunski (1983).

<sup>36</sup> Pestre (1984), p. 112.

différence qualitative de leurs travaux selon leurs lieux de publications (dans des revues mathématiciennes - dans lesquels l'accent est mis sur l'intérêt purement mathématique des théories physiques - ou dans des revues de physique - dans lesquelles le contenu mathématique est réduit au minimum). Dans leur étude de l'émergence de la physique théorique en Allemagne, Christa Jungnickel et Russell McCormmach indiquent :

« It was generally recognized that the *Annalen* was not always the appropriate place to publish a mathematical physics paper. Bezold published his experiments on optical illusions in the *Annalen*, but he published their mathematical theory elsewhere, observing that readers of the *Annalen* did not all take to mathematical deductions. [...] »

Physicists often published their more mathematically rigorous work in journals they shared with mathematicians. There their work appeared alongside the mathematicians work on physical, usually mechanical, problems, in which the interest was predominantly mathematical, not physical<sup>37</sup>».

Pourtant, des personnes comme Von Helmholtz, qui se situent résolument du côté de la physique, insistent sur la nécessité pour tout physicien (quelque soient par ailleurs ses inclinaisons personnelles pour l'expérience ou la théorie) d'avoir une compétence de base à la fois en théorie et en expérimentation. Toujours selon Jungnickel et McCormmach :

« Addressing the Prussian Academy of Sciences on his predecessor Magnus, Helmholtz explained that a good theorist needs wide practical theoretical training and that a good theorist needs wide experimental training. He impressed his view of the complementary nature of experimental and theoretical approaches on his students in Berlin. Wilhelm Wien, one of these students, regarded it as a particular service of Helmholtz to strive to bring theoretical and experimental physics together into "one great science" »<sup>38</sup>.

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle dans certaines universités germaniques, l'accent est donc mis sur l'unité de la physique. La spécialisation et l'autonomisation de la physique théorique se fait très lentement. Kirchhoff obtient à Berlin un poste de premier plan uniquement dédié à la physique théorique dès 1875, mais il le doit avant tout à sa stature. Si les années 1870 et 1880 sont marquées par la création de postes de professeurs extraordinaires de physique théorique dans de nombreuses universités de Prusse, il s'agit en réalité de tremplins pour des jeunes chercheurs visant des positions institutionnellement plus élevées. Mais ces postes dédiés à l'enseignement de la physique théorique sont des signes qu'elle est considérée dès ces années comme devant faire partie du bagage de tout physicien. Progressivement, les plus brillants théoriciens arrivent à obtenir des postes de théoriciens permanents et la physique théorique s'autonomise. Mais dans les centres de recherche qui auront par la suite une importance capitale dans le développement des théories modernes (comme Munich et Göttingen), elle reste pratiquée au sein des universités dans les Instituts de physique et une très grande proximité persiste entre physiciens théoriciens et physiciens expérimentateurs. Les travaux de Hertz en électromagnétisme et de l'école de Sommerfeld montrent que les avancées théoriques et expérimentales sont souvent intégrées dans les pays germaniques durant cette période, même s'il ne s'agit pas d'une règle absolue (par exemple les travaux théoriques d'Einstein ou de Boltzmann prennent parfois du recul sur toute actualité expérimentale brûlante et se concentrent souvent sur les difficultés internes des théories).

---

<sup>37</sup> Jungnickel, McCormmach (1986), p. 15.

<sup>38</sup> *Ibid.* p. 21.

En France au contraire, au cours du début du XX<sup>e</sup> siècle, seuls quelques physiciens gravitant autour de Paul Langevin intègrent aussi fortement leurs travaux théoriques à un intérêt expérimental immédiat. Par exemple, les physiciens qui abordent la question du rayonnement thermique en France au début du siècle (comme Charles-Édouard Guillaume, Edmond Bouty, Charles Fery) ne se sont guère intéressés aux travaux théoriques allemands sur le sujet, qui se sont essentiellement diffusés en France par l'intermédiaire de Marcel Brillouin et de son activité au sein du Collège de France<sup>39</sup>. Edmond Bauer est, semble-t-il, le premier Français à se familiariser avec les travaux de Planck, Lorentz, Ehrenfest ou Einstein sur la théorie du corps noir à laquelle il consacre une partie de sa thèse de doctorat alors que l'autre partie est consacrée à des travaux expérimentaux<sup>40</sup>. Autre exception notable, Léon Bloch publie en 1918 dans la *Revue générale des sciences* deux exposés sur les travaux quantiques effectués à l'étranger pendant la seconde guerre mondiale<sup>41</sup>. Mais rare sont les physiciens français à chercher à approfondir aussi loin que ne le font Léon Bloch et son frère Eugène leur connaissance des théories quantiques. Non pas qu'ils ignorent complètement la théorie quantique de l'atome de Bohr et ses prolongements, dont les physiciens spécialisés dans l'étude des spectres font régulièrement mention dans leurs articles. Le livre de Sommerfeld, *Atombau* circulait déjà dans le cercle de Paul Langevin. D'après le témoignage de son fils Jean, les théories quantiques au début des années 1920 étaient sans doute mieux connues et considérées en France qu'on ne l'a souvent prétendu<sup>42</sup>. Mais en dehors du cercle des Langevin-Perrin-Curie dont Jean Langevin se réfère ici essentiellement, la place de ces théories reste modeste dans les articles des physiciens français, n'allant souvent pas beaucoup plus loin que la mention de la formule de Bohr qui relie les niveaux d'énergie avec la fréquence du rayonnement émis ( $\Delta E = h\nu$ )<sup>43</sup>. On se réfère par exemple rarement au principe de correspondance permettant de discuter des transitions interdites et des intensités des raies, ou encore à l'énigme que constitue l'effet Zeeman anomal pour la présente théorie.

Une raison qui a souvent été évoquée pour expliquer la faiblesse théorique française est la domination du positivisme. Le physicien français, considérant qu'il est extrêmement imprudent d'aller au-delà des faits expérimentaux, accueille avec circonspection les idées hardies proposées par les nouvelles théories. Nous aurons à rediscuter de cette idée, et peut-être la nuancer, mais on peut déjà indiquer qu'elle semble reposer sur des éléments solides. Nous pouvons ici invoquer les témoignages extrêmement convergents des théoriciens comme Léon Brillouin, Jean Ullmo, Edmond Bauer ou Louis de Broglie. Brillouin indique par exemple :

« Bouasse, who was a very prominent figure in French science, was very much against relativity and quanta, and in that respect he had a very bad influence on the younger generation. Too many young students did read the books of Bouasse which were the best in French by the time, and so took the ideas of the old professor who denies any kind of physical meaning to all this quanta material.<sup>44</sup> »

<sup>39</sup> Bustamente (2002), pp. 63-107.

<sup>40</sup> Bauer (1913). Bauer commence à travailler sur ce sujet à partir de 1907.

<sup>41</sup> Bloch, Léon (1918).

<sup>42</sup> Jean Langevin (1963).

<sup>43</sup> Autre exception notable, Alexandre Dauvillier, avec qui Louis de Broglie signera quelques uns de ses premiers articles.

<sup>44</sup> Brillouin, Léon (1962).



Plus amusante, l'anecdote de Louis de Broglie rapportée par Georges Lochak qui met en scène Gabriel Lippmann, prix Nobel de physique et Professeur à la Sorbonne, tentant de réfuter la théorie de la relativité d'Einstein à ses élèves, illustre cette méfiance envers le théorique :

« Ainsi, il refusait le retard relativiste des horloges d'après lequel un observateur en mouvement par rapport à un autre voit le temps s'écouler plus lentement pour l'autre que pour lui [...]. Or Lippmann se vantait qu'ayant accordé sa montre de gousset avec la pendule du salon, il l'avait promenade « très vite » sur un chariot autour du jardin et n'avait observé aucun retard<sup>45</sup> ».

Sans être en complète contradiction avec les témoignages précédents, Jean Langevin brosse un portrait plus nuancé de la situation. Beaucoup de physiciens se tenaient largement informés des nouvelles théories<sup>46</sup>, mais Langevin reconnaît cependant la présence d'un certain nombre de physiciens « rétrogrades », surtout à la Sorbonne, qui étaient pour l'essentiel des thermodynamiciens classiques ou des adeptes de la métrologie de précision.

### 3- Conclusion en suspens

J'ai cherché à mettre en évidence le positionnement particulièrement ambigu de la physique théorique en France au début du XX<sup>e</sup> siècle. La principale donnée est que la physique théorique telle qu'elle commence à paraître au début du XX<sup>e</sup> siècle en Allemagne ne trouve pas pleinement sa place dans le paysage institutionnel français. Je laisse pour la suite la discussion de l'incidence de cet état de fait dans la réception de la mécanique quantique en France.

Pestre indique que la dichotomie entre physique mathématique et physique théorique retrouve une pertinence dans les développements de la physique théorique en France pendant les années 1930, qui plus est principalement autour de Louis de Broglie. Parce que cette dichotomie a également été ressentie par certains témoins que j'ai pu rencontrer, mais aussi parce que nous trouvons des traces de cette intégration entre physique théorique et mathématique jusque tard dans le vingtième siècle — avec notamment l'importance de l'Institut Henri Poincaré, qui constitue pendant longtemps le seul espace donné à la physique théorique mais qui est partagé avec les mathématiciens —, il m'a semblé important de présenter cet aspect afin de le discuter plus en profondeur pour les périodes que nous allons plus précisément étudier.

## III- La physique française des années 1920 et 1930 : quelques points de repère

L'objectif de cette troisième partie est de faire une présentation globale de la physique française entre les deux guerres. Seront abordés les thèmes de la démographie des physiciens, la présentation des différents laboratoires, les axes de recherches privilégiés et l'enseignement de la physique. Comme je l'ai indiqué, Dominique Pestre a produit une étude assez complète du milieu

---

<sup>45</sup> Lochak (1992), p. 41.

<sup>46</sup> Jean Langevin (1963). Comme exemple de personnes « au courant », Langevin cite, outre son père, les Brillouin, les frères Bloch, Maurice de Broglie et Aimé Cotton. Lippmann était selon lui également sans doute « au courant », mais était « fantaisiste ».

physicien français durant l'entre-deux-guerres. Je reprends ici les résultats les plus intéressants auxquels il est parvenu en les complétant et les discutant à partir d'autres analyses.

## 1- Démographie des physiciens et laboratoires

En raison des différences de statut des physiciens, il est assez difficile d'établir précisément leur nombre. Mais notre besoin à cet égard se satisfait amplement d'une estimation approximative. Celle de Pestre se base sur quelques recensements produits irrégulièrement au cours de cette vingtaine d'années, notamment des listes de personnel de chercheurs envoyées en 1931 par tous les laboratoires associés à la Faculté des sciences de Paris au doyen afin de répartir « le sou de laboratoire », complétées par divers rapports de doyens et de directeurs de laboratoires, ainsi que par des recensements effectués à l'occasion de l'entrée dans la seconde guerre mondiale.

En ce qui concerne les laboratoires liés à Faculté de Paris, Pestre estime qu'une forte croissance s'est produite jusqu'aux débuts des années 1930 (multiplication par deux voire par trois du nombre de chercheurs) pour arriver à un total d'un peu plus de 150 chercheurs en 1931. Par la suite, il y a stagnation jusqu'à la seconde guerre mondiale. En intégrant les quelques laboratoires parisiens indépendants de la Faculté des sciences (laboratoire du Collège de France, du Muséum, de l'école de Physique et Chimie de la ville de Paris, des Grandes Écoles, laboratoires privés...), le nombre s'élève à plus de 200 à la veille de la guerre. Les estimations sont encore plus difficiles en ce qui concerne la province : Pestre avance un chiffre qui n'excède pas 180 avant la guerre. La communauté des physiciens français (dans laquelle sont inclus également les étudiants débutant un véritable travail de recherche) ne s'élève donc jamais nettement au-dessus de 400 personnes durant cette période. Parmi ces individus, la place occupée par les théoriciens est extrêmement réduite<sup>47</sup>. Le nombre de théoriciens est insignifiant avant la fin des années 1920. Pestre les estime à deux (Louis de Broglie et Léon Brillouin) mais, selon la manière de les compter (intégration ou non des physiciens qui n'ont pas un statut institutionnel de pur théoricien mais qui, dans les faits, s'occupent beaucoup plus de théorie que d'expérience, intégration ou non des mathématiciens qui s'intéressent à la physique théorique), on peut par exemple ajouter Paul Langevin, Edmond Bauer et Marcel Brillouin (d'autant plus que si ce dernier possède une formation de mathématicien il possède également un doctorat de physique et occupe au Collège de France une chaire de physique théorique), voire des mathématiciens comme Emile Borel, Elie Cartan, Paul Lévy, Jacques Hadamard ou Gustave Juvet. Ce nombre augmente progressivement à partir de la fin des années 1920 mais reste très réduit jusqu'aux années 1940. Au total, il n'y a jamais guère plus d'une vingtaine de purs physiciens théoriciens en France pendant cette période. C'est bien sûr ce petit groupe sur lequel nous allons essentiellement nous concentrer au cours de cette étude. Mais il n'est pas inutile de regarder les activités de recherche des expérimentateurs pour se faire une idée des possibilités d'interactions entre eux et les théoriciens quantiques.

Pour ce faire, je propose ici de rassembler dans un tableau synthétique les diverses informations que l'on peut trouver dans l'ouvrage de Pestre<sup>48</sup> (en les complétant quelques fois) sur la composition des différents centres de recherche en physique durant l'entre-deux guerres.

---

<sup>47</sup> Pestre (1984). Pestre avance ces chiffres dans une partie qui traite de la physique expérimentale, mais on peut constater que sont également inclus dans les sources sur lesquelles il s'appuie les physiciens théoriciens.

<sup>48</sup> Ce tableau, incomplet, est basé sur les données que l'on peut trouver dans Pestre (1984) pp. 66-72. Les noms des théoriciens sont en gras. La case des référents indique dans la plupart des cas le responsable du laboratoire ou du centre de recherche en question, mis à part dans le cas de Jean Cabannes pour Bordeaux et de Maurice de



Référents	Laboratoires	Nombres de chercheurs (à titre indicatif)	Quelques noms importants	Axes de recherches
Marie Curie (jusqu'en 1934) puis Frédéric et Irène Joliot-Curie	Laboratoire Curie de l'Institut du Radium (Fac. Paris)	34 (1931)	<b>Alexandre Proca</b> , Salomon Rosenblum	Radioactivité puis physique nucléaire
	Laboratoire de physique et chimie nucléaire du Collège de France de F. Joliot (1937)			
Paul Langevin	Laboratoire du Collège de France		<b>Edmond Bauer</b> , <b>Jacques Solomon</b>	Spectroscopie atomique, rayons X, optique atmosphérique, ferromagnétisme, effet Raman, état liquide, physique théorique
	Laboratoire de l'Ecole de physique et chimie		René Lucas	Quartz piézoélectrique, ultrasons, biréfringence magnétique
Jean Perrin	Laboratoire de chimie-physique (Fac. Paris)	10 (1931)	Pierre Auger	Rayons X, effet photo-électrique, neutron, rayonnement cosmique + sujets ponctuels variés
Maurice de Broglie	Laboratoire de physique des rayons X de M. de Broglie	8 en moyenne durant les années 1930	Jean Thibaut, Jean-Jacques Trillat, Louis Leprince-Ringuet, Alexandre	Rayons X puis physique nucléaire et rayons cosmiques

Broglie pour Lyon et Besançon. Dans ces cas, le terme « référent » désigne plutôt un « maître » d'origine commune aux responsables des nouveaux laboratoires, afin de mettre en évidence les filiations. Les personnalités que j'ai placées dans la colonne « quelques noms importants » sont des physiciens qui ont fréquenté le laboratoire correspondant au moins pendant quelque temps. Cela ne signifie pas qu'ils sont restés dans ce même laboratoire pendant toute la période étudiée. Enfin, la date entre parenthèses dans la colonne « nombre de chercheurs » désigne l'année pour laquelle ce chiffre est obtenu. Bien entendu, ce chiffre peut fluctuer au cours de la période et n'est présent qu'à titre indicatif. Les axes de recherche ont été établis par Pestre en étudiant la production scientifique des membres de ces différents centres dans le *Journal de Physique et le Radium*. Enfin, le tour des laboratoires n'est pas exhaustif : seuls les principaux centres de recherche de Province ont été intégrés et certains laboratoires parisiens à la frontière de la physique et des applications industrielles ne sont pas mentionnés. La présence ou l'absence de certains laboratoires est ainsi quelques fois arbitraire, mais l'important ici est de donner une vue d'ensemble des principaux centres de recherche dans ce qu'on pourrait appeler, par défaut, la physique fondamentale.

			Dauvillier	
	Laboratoire de Trillat à Besançon			Optique électronique
	Laboratoire de Thibaut à Lyon			Physique nucléaire
Aimé Cotton	Recherches physiques (Fac. Paris)	28 (1931)		Optique (électro et magnéto-optique, spectroscopie infrarouge)
	Laboratoire du Grand Aimant	6 à 7		Magnétisme
George Bruhat	E.N.S.	9 (1932)	Eugène Bloch, Léon Bloch	Spectroscopie
Jean Becquerel	Muséum	2		Optique et magnétisme des cristaux
Charles Maurain	Physique du Globe	21 (1931)		Physique du globe
Charles Mauguin	Minéralogie (Fac. Paris)	8 (1931)		Cristallographie
Henri Bénard	Mécanique expérimentale des fluides (Fac. Paris)	19 (1931)		Mécanique des fluides
Jean Villey	Mécanique physique et expérimentale	10 (1931)		
Pierre Weiss	Strasbourg		Robert Forrer, Louis Néel	Propriétés magnétiques des corps
Gustave Ribaud	Haute température (1933) (Fac. Paris)			Haute température, four à induction
Jean Cabannes	Montpellier		Yves Rocard (collaborateur ponctuel)	Spectroscopie, effet Raman, étude de l'atmosphère
	Bordeaux		Alfred Kastler	
Léon Brillouin puis Louis de Broglie	Institut Henri Poincaré	De 2 (1928) jusqu'à une dizaine (fin des années 1930).	<b>Alexandre Proca, Louis Goldstein, Jean-Louis Destouches, Gérard Petiau, Francis Perrin</b>	Physique théorique

## 2- Les axes de recherches

On peut constater à partir du tableau que, même si les sujets qui prédominent en France sont l'optique spectroscopique et les propriétés électromagnétiques des corps, les nouveaux champs de la

physique sont également présents (physique nucléaire, rayons cosmiques). Le tableau nous indique également que certains théoriciens (en gras) fréquentent – au moins épisodiquement – les laboratoires. Pour compléter les informations que l'on peut y trouver, on peut indiquer qu'une des caractéristiques majeures de la recherche est l'émiettement des sujets. Pestre indique :

« Dans l'immense majorité des cas, le travail semble parcellisé, atomisé même dans les laboratoires les plus gros. Peut-être ce schéma devrait-il être nuancé à la fin des années 30, les équipes regroupées autour des maîtres plus jeunes – Joliot, Auger, Thibaud – semblant pratiquer un travail collectif plus intense. »

Cette exception peut également être étendue au laboratoire de Maurice de Broglie dans lequel existe également une véritable dynamique de groupe. Dans les autres cas, les laboratoires sont souvent un simple lieu de regroupement de chercheurs travaillant la plupart du temps de manière solitaire sur leurs propres centres d'intérêts. Cette caractéristique pose d'emblée la question de la possibilité d'interaction des théoriciens avec les expérimentateurs : on ne voit guère comment une telle collaboration serait possible si les expérimentateurs n'ont pas l'habitude d'interagir, même entre eux.

Pour compléter cette description et avoir avec plus de précision le poids respectif des différents thèmes de recherche dans la production totale, ainsi que leurs dynamiques, je propose également d'utiliser le travail d'analyse du *Journal de Physique* effectué par Pestre<sup>49</sup>. Le tableau ci-dessous concerne la physique expérimentale.

Rubrique	Total	Années 1920-1932	Années 1933-1940	Remarques
Radioactivité, physique nucléaire (expérimentale), physique des particules...	145	44 dont 40 du labo Curie	101 dont 83 du labo Curie et 14 du labo Thibaud	Quelques travaux du laboratoire Curie relèvent des rayons X
Rayons cosmiques	25	2	23 (Auger, Dauvillier)	Quelques articles du groupe d'Auger concernent les neutrons
Spectro-atomique et moléculaire, diffusion de la lumière, effet Raman...	109	53	56	Principalement les laboratoires de Cabannes, Bloch, Bruhat, Cotton
Magnéto-optique, électro-optique	32			Principalement laboratoires de Cotton, Bruhat
Autres articles d'optique (y compris l'appareillage)	39	23	16	
Rayons X, étude des structures cristallines,	58	35	23	Principalement les laboratoires de de Broglie et

<sup>49</sup> Reproduction du tableau de Pestre (1984), pp. 81-82.

diffraction électronique				Perrin
Propriétés magnétiques des corps	74	46	28	Principalement les laboratoires de P. Weiss et les travaux de J. Becquerel
Décharges dans les tubes, tubes, compteurs, semi-conducteurs...	46	25	21	Principalement Dunoyer, Reboul, Dechêne
Électromagnétisme et électricité (exp. et appl.)	44	23	21	Dont 10 : Pauthenier
Acoustique	30	18	12	Dont 16 : Z. Carrière
Mécanique physique, mécanique des fluides	18	7	11	
Thermodynamique macroscopique classique	18	9	9	
Astrophysique de l'atmosphère (entre parenthèses physique du globe)	26(+7)	6(+4)	20(+3)	À noter que l'astrophysique et la physique de l'atmosphère utilisent principalement la spectroscopie
Chimie-physique poudres	41	17	24	Principalement les laboratoires de Perrin et E. Darmois

Le choix effectué par Dominique Pestre du *Journal de Physique et le Radium* se justifie par le fait que ce journal est, en France, avec les notes aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, le principal espace de publication d'articles de physique générale et le seul à se prêter facilement à une telle analyse (les notes aux *Comptes rendus* ne sont pas spécifiquement destinées à la physique et l'organisation des volumes rendrait une investigation systématique extrêmement laborieuse).

Ce tableau confirme l'importance des études d'optique et des propriétés électromagnétiques des corps : ces champs de recherche ne faiblissent pas durant les vingt années. Mais seule une analyse qualitative peut apporter des éléments sur la question de savoir si cette permanence indique un certain conservatisme. La spectroscopie atomique perd par exemple sa place de champ d'investigation aux frontières du savoir depuis la fin, voir le milieu des années 1920. Il s'agit alors seulement de raffiner les données quand d'autre part, les mécanismes fondamentaux de la physique atomique sont alors parfaitement connus. La spectroscopie moléculaire relève de la même démarche, mis à part dans le cas où ces investigations vont de pair avec un intérêt pour les modélisations quantiques des molécules (qui en sont alors à leurs balbutiements), ce qui n'est ici pas le cas. La mécanique quantique est également susceptible de renouveler l'investigation des propriétés électromagnétiques des corps. Or, la lecture

des articles démontre que ce n'est clairement pas le cas. Dans tous les cas, les éventuels éléments de théorie quantique qui interviennent dans les travaux expérimentaux appartiennent à l'ancienne théorie des quanta et ces investigations sont souvent complètement déconnectées de toute perspective théorique nouvelle. On peut imaginer que les équipes de recherche qui s'intéressent à ces sujets ne sont aucunement soucieuses d'interagir avec des physiciens spécialistes des nouvelles théories.

Le tableau laisse également apparaître l'importance de la physique subatomique (radioactivité, physique nucléaire, rayons cosmiques) dont la place augmente pendant la deuxième décennie (avec un poids écrasant pris par le groupe Joliot-Curie). Là encore, une analyse qualitative est nécessaire. Pestre distingue par exemple les études de « radioactivité classique » et l'étude des noyaux et des particules, et indique :

« Les Français maintiennent dans les années 30 des recherches importantes dans le domaine de la radioactivité « classique » : rayons  $\beta$  et  $\gamma$  (connaissance des spectres radioactifs), lois d'absorption, propriétés des radio-éléments, radio-chimie... alors que les Américains s'orientent davantage vers l'étude des noyaux, des particules, des rayons cosmiques, ce qui se marque par le fait que leurs articles débouchent souvent sur des travaux théoriques utilisant abondamment la mécanique quantique<sup>50</sup> ».

Pour donner davantage de sens à cette étude, Pestre compare effectivement la production française qui paraît dans le *Journal de Physique* à la production américaine apparaissant dans *Physical Review*. Ses principales conclusions sont que, par rapport à la physique américaine, la physique française se caractérise par une inertie beaucoup plus forte, un manque d'adaptabilité aux domaines innovants (physique électronique, physique des solides abordée sous l'angle microscopique, physique corpusculaire et du noyau — soit globalement l'ensemble de ce que l'on pourrait désigner par le terme de « physique microscopique ») et une constance dans le poids de domaines comme l'optique ou encore la mécanique des fluides, « lieu d'excellence de la physique continuiste, de la physique des équations différentielles et terre d'élection des mathématiques »<sup>51</sup>. Les exceptions françaises qui imitent leurs collègues américains sont d'après lui les équipes de Maurice de Broglie, de Frédéric Joliot et de Pierre Auger. Nous avons ici affaire à des traits qui pourraient s'avérer essentiels dans notre description de la physique expérimentale française. Mais - et Pestre en convient - la comparaison avec la seule physique américaine paraît insuffisante pour conclure qu'il s'agit là de caractéristiques spécifiques à la France de cette période. La physique américaine est au début du XX<sup>e</sup> siècle une physique en pleine construction qui n'a pas de si longues traditions que ces homologues européennes. Un pays davantage comparable à la France du point de vue de l'ancienneté des traditions scientifiques, et avec lequel je ferais plus volontiers des comparaisons pour la suite de l'étude, est la Grande-Bretagne. Outre les raisons de langue et d'accessibilité, un tel choix me semble préférable à l'Allemagne car la Grande-Bretagne, comme la France, est essentiellement dans une position de réception de la mécanique quantique (chacun des deux pays a un seul contributeur majeur : Paul Dirac pour l'Angleterre et Louis de Broglie pour la France<sup>52</sup>) alors que l'Allemagne l'a produite<sup>53</sup>. J'ai donc tenté d'entreprendre une étude similaire de comparaison du contenu du *Journal de Physique*, cette fois-ci avec un journal britannique, mais il s'est avéré qu'il est extrêmement difficile de proposer une

---

<sup>50</sup> Pestre (1984), p. 84.

<sup>51</sup> Pestre (1984), p. 86.

<sup>52</sup> Cette remarque n'a pas pour but de comparer les apports respectifs à l'élaboration de la mécanique quantique des deux physiciens.

<sup>53</sup> Un autre choix intéressant eut été l'Italie. Mais on cite plus souvent la Grande-Bretagne pour référence dans la littérature.

grille d'analyse pertinente et d'obtenir des résultats significatifs. Pour commencer, ce genre d'études est souvent instable par rapport à un petit changement dans les intitulés des axes de recherche. Ensuite, elles comportent de nombreux pièges. Par exemple, pour la Grande-Bretagne, la question se pose de savoir quel journal choisir. Au moins trois candidats existent : les *Proceedings of the Royal Society (PRS)*, *Nature* et *Philosophical Magazine*. D'après les travaux de Kojevnikov et de Novik<sup>54</sup>, *Nature* est la revue britannique la mieux placée dans le nombre de publications portant sur la mécanique quantique dans les années 1925 et 1927 (16 articles). Cependant, le caractère généraliste et la structure de la revue ne permettent pas aisément une telle étude. Viennent ensuite les *PRS* avec 8 articles, et *Philosophical Magazine* avec seulement un article<sup>55</sup>. Les *PRS* m'ont donc paru être la revue de comparaison la plus pertinente. En cela, quelques témoignages, comme celui de Mott, m'ont conforté :

« As regards publications of research papers, it was normal for Fowler<sup>56</sup> or one of our colleagues on the experimental side to communicate all our publications to the *Proceedings of the Royal Society*, except perhaps minor ones which went to the *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. I do not know why this was. Before 1925 Fowler's more important papers appeared in the *Philosophical Magazine*; but in the Cavendish in the 1930s we were hardly aware of other primary scientific journals in the United Kingdom, and the time had certainly not yet come when the (American) *Physical Review* and *Physical Review Letters* began to attract papers from Europe. The *Zeitschrift fur Physik* had great prestige, but as far as I remember they published only in German, and the *Zeitschrift* was already coming under criticism for "accepting everything". [...] For us, the *Proceedings of the Royal Society* were the thing, and it was only after the war that other journals in the United Kingdom became competitive, so far as the atomic physicists<sup>57</sup> were concerned<sup>58</sup>. »

Cependant, le fait de la présence de journaux concurrents, anglais ou étrangers, introduit tout de même des biais qui rendent extrêmement difficile de tirer des conclusions solides à partir d'une telle étude. Je présente les principaux résultats de l'étude portant sur la physique expérimentale en annexe<sup>59</sup>, mais il ne semble pas que l'on puisse tirer des enseignements forts à partir de celle-ci. On peut tout de même oser faire les remarques suivantes :

- La principale différence entre les deux pays est que la France s'oriente d'avantage que la Grande-Bretagne vers la physique subatomique (notamment la radioactivité), alors que la Grande-Bretagne s'intéresse plus aux propriétés microscopiques de la matière (par exemple les réseaux cristallins).

- Globalement, il est difficile de dégager le fait supposé que la physique française posséderait une inertie particulièrement importante par rapport à la Grande-Bretagne à partir d'une telle étude. Cela ne veut pas dire que ce n'est pas le cas (il faudrait rentrer beaucoup plus profondément dans une étude qualitative des travaux pour en avoir la certitude), mais cela indique qu'il est néanmoins difficile de l'objectiver. Cela pose donc la question – sans y répondre – de savoir si on ne

<sup>54</sup> Kojevnikov, Novik (1989), pp. 115-160.

<sup>55</sup> Également bien classée la revue *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* qui est cependant une revue plus locale. Malgré son caractère local, cette revue est assez utilisée par les physiciens de Cambridge, qui est le centre britannique le plus actif du Royaume-Uni dans les études qui sont liées aux nouvelles théories entre les deux guerres.

<sup>56</sup> Pour information, Fowler, beau-fils de Rutherford, est une des personnes, si ce n'est la personne la plus influente dans la communauté de la physique moderne en Grande-Bretagne pendant les années 1920 et 1930.

<sup>57</sup> Pour rappel, le terme de « physique atomique » n'était pas utilisé uniquement pour désigner la physique portant à proprement parler sur l'atome, mais était plutôt un terme générique pour désigner l'ensemble de la microphysique.

<sup>58</sup> Mott (1984), p. 129.

<sup>59</sup> Voir annexe 1.



peut pas nuancer la conclusion de Pestre selon laquelle la physique française serait caractérisée par une inertie particulièrement grande.

-Il n'apparaît pas que la France se désintéresse particulièrement de la physique microscopique en général, comme le démontre le grand poids pris dans la recherche française par la physique subatomique relativement à la Grande-Bretagne. Mais il est vrai qu'une analyse plus qualitative semble montrer que les expérimentateurs français se montrent un peu moins spéculateurs sur la structure des corps microscopiques qu'ils étudient. Par exemple, les papiers coécrits par des purs expérimentateurs et des théoriciens maniant la mécanique quantique existent dans les *PRS*, alors qu'on en trouve difficilement dans le *Journal de Physique*.

Pestre a également étudié la physique théorique française, sans entreprendre toutefois de la comparer directement avec la physique théorique américaine. Il met néanmoins nettement en exergue la portion congrue réservée à la théorie par rapport à l'expérience en France. Cette portion croît cependant sensiblement à partir des années 1930, à travers les travaux des jeunes théoriciens qui émergent au début de la décennie. Mais, remarque-t-il, cette physique théorique renoue avec la tradition française de physique mathématique du début du siècle, et possède un caractère très abstrait et est peu tourné vers l'expérience. Ceci est particulièrement vrai pour les théoriciens qui entourent Louis de Broglie.

Une telle étude comparative entre la France et la Grande-Bretagne, concernant cette fois la physique théorique, possède les mêmes biais que la précédente, mais peut cependant être entreprise avec moins de difficultés en raison du fait que le nombre réduit d'articles, ainsi que leur nature, rendent plus aisé leur classement dans les différentes catégories proposées, ce qui confère aux résultats une plus grande stabilité par changement de grille d'analyse. En contrepartie, l'échantillon moins élevé rend les résultats moins significatifs. Les principaux résultats sont également proposés en annexe. Peut-être un résultat de l'étude peut être particulièrement discuté : la présumée faiblesse française de la théorie relativement à l'expérience n'est pas si évidente lorsqu'on la compare au cas du Royaume-Uni. Le rapport nombre d'articles théoriques / nombre d'articles total augmente régulièrement durant les vingt ans pour les *PRS* (de 20 à 30%) alors qu'il est dès les années 1920 autour de 30% pour le *Journal de Physique* et qu'il reste stable. Mais, le plus intéressant ici est, bien entendu, ce qui concerne plus spécifiquement la physique théorique moderne. Or, même dans ce cas, la physique française n'apparaît pas moins théorique que la physique britannique, tout au contraire ! La physique théorique moderne<sup>60</sup> britannique apparaît quasiment inexistante en 1922 alors qu'en France, les travaux notamment de Louis de Broglie, de Marcel et Léon Brillouin lui permettent d'exister, même si ce n'est que marginalement. On peut toutefois nuancer ce résultat en se rappelant le témoignage de Mott concernant le fait que les principaux articles de Fowler avant 1925 étaient publiés dans le *Philosophical Magazine*<sup>61</sup>. Le poids accordé à la physique théorique moderne progresse ensuite progressivement dans les deux pays, et tend à se rejoindre au même niveau autour de 25% à la fin des années 1930. Cela ne remet pas en cause en tant que telle la présumée faiblesse de la physique théorique française. D'une part, le nombre d'articles ne préjuge en rien de la qualité, d'autre part, cette étude ne compare pas la productivité brute mais uniquement la productivité relative rapportée à l'ensemble des publications de chacun des deux journaux. Enfin, il est tout à fait possible, comme le montre la remarque précédente sur Fowler, que davantage de travaux théoriques britanniques soient

---

<sup>60</sup> Par physique théorique moderne, j'entends les travaux théoriques utilisant les théories quantiques, relativistes, statistiques, ou encore l'électrodynamique de Lorentz.

<sup>61</sup> C'est également dans ce journal que Niels Bohr a publié son modèle atomique en 1913.

publiés dans *Nature*, dans *Philosophical Magazine*, dans les *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, ou encore dans les journaux allemands, bien que le témoignage du théoricien Mott tende à indiquer que les *PRS* reste un très bon choix, au moins en ce qui concerne la fin des années 1920 et les années 1930.

En prenant un peu de recul sur ces résultats, il est évident que les théoriciens français ne peuvent que difficilement rivaliser avec des théoriciens du calibre de N. Mott, P.A.M. Dirac, C.G. Darwin, J. Lennard-Jones, sans parler des apports des physiciens étrangers venant travailler en Grande-Bretagne durant les années 1930 (H. Massey, W. Heitler, H. Bethe, M. Born ou R. Peierls, ces deux derniers devenant naturalisés). Ces résultats posent cependant la question – sans toutefois y répondre nettement – de savoir si la domination de l'expérience par rapport au théorique est si spécifique à la France durant cette période. Il est très probable qu'au cours des années 1920, seuls les pays germaniques donnaient sensiblement plus de poids à la « physique théorique moderne » que la France. Même à Cambridge, qui fut pourtant sans aucun doute le lieu britannique le mieux intégré aux réseaux internationaux de physique moderne, la situation pour un théoricien dans les années 1920 était difficile et l'ambiance intellectuelle, dominée par Rutherford, était à la méfiance envers les théories trop sophistiquées, même si les choses évoluèrent favorablement pendant les années 1930, notamment sous l'impulsion du Kapitza Club<sup>62</sup>, de l'intérêt des nouveaux expérimentateurs pour la théorie (comme Blackett) et de l'apport des physiciens étrangers (comme Gamow)<sup>63</sup>.

Un dernier élément, qui apparaît plus par une étude qualitative que quantitative des travaux théoriques est le suivant. Pestre distingue, comme nous l'avons déjà dit, la physique théorique et la physique mathématique, et indique que cette dernière est particulièrement présente en France. En réalité, là encore, la France ne semble pas si originale. Dans les *PRS*, notamment dans les années 1920, de nombreux articles de physique théorique semblent être des prétextes à des développements de modes de résolution de problèmes mathématiques (je ne parle pas ici des articles purement mathématiques qui se trouvent dans les *PRS* que je n'ai pas comptabilisés). Il faut de plus rappeler que les grandes figures de la physique théorique britannique des années 1920 que sont Dirac, Fowler et Eddington étaient institutionnellement rattachées aux mathématiques, et que ce qui constitue la norme aujourd'hui dans de nombreux laboratoires (beaucoup plus d'intégration entre théoriciens et expérimentalistes) était en Europe plutôt une exception (Göttingen, Copenhague, Munich, soient les villes qui ont enfanté la mécanique quantique)<sup>64</sup>. La situation évoluera plus favorablement en Grande-Bretagne qu'en France durant les années 1930, comme l'indique Harrie Massey :

« I was fortunate in that, through carrying out theoretical as well as experimental research, I was a member of theoretical research group which worked rather loosely under the supervision of R H Fowler, Rutherford's son-in-law. The existence of this group marked an important break away from the traditional schools of applied mathematics in being directly associated with an active physics laboratory<sup>65</sup> »

En revanche, certaines données paraissent franchement confirmer la conclusion de Pestre selon laquelle, au cours des années 1930, les travaux théoriques français sont particulièrement éloignés

---

<sup>62</sup> Rencontre hebdomadaire informelle de physiciens de Cambridge, qui joua un grand rôle dans les rencontres entre théoriciens et expérimentateurs durant les années 1920 et 1930.

<sup>63</sup> Voir Hendry (1984).

<sup>64</sup> Voir Schweber (1986).

<sup>65</sup> Massey (1984), p. 98



des applications. En effet, on constate que relativement aux Britanniques, les théoriciens français travaillent plus *sur* les théories cadres elles-mêmes plutôt qu'à leur utilisation à la résolution de problèmes. En particulier, la modélisation des systèmes complexes par des approches microscopiques (théories des solides, des liquides et des gaz, rayonnement thermique...) est sensiblement plus faible en France qu'en Grande-Bretagne durant les années 1930.

### 3- L'enseignement

Nous finissons ce tour d'horizon en discutant de l'enseignement de la physique française durant l'entre-deux-guerres, notamment dans les facultés des sciences, à l'ENS et à Polytechnique qui représentent les principales institutions susceptibles de former les physiciens français.

#### La physique moderne

Dominique Pestre a essentiellement étudié l'enseignement de la physique dans les Facultés des sciences, en distinguant le cas de la Province et le cas de Paris. Je serai expéditif sur le cas de la province, en indiquant seulement que l'accent y est souvent mis sur l'enseignement de la physique appliquée plutôt que sur la physique générale et fondamentale.

Les années 1920 voient le nombre de professeurs, et en conséquence le nombre de C.E.S.<sup>66</sup> et l'offre d'enseignement, très fortement augmenter : le nombre de professeurs à la faculté des sciences de Paris passe d'un peu plus d'une dizaine à un peu plus d'une trentaine durant la décennie. Les principaux domaines qui bénéficient de cette croissance sont l'enseignement technique (électrotechnique, aéronautique, optique appliquée...) et la physique moderne. Cette dernière obtient les gains suivants : tout d'abord en 1920 la création d'une chaire de *physique théorique et physique céleste* (Cotton puis Leduc), puis le dédoublement de cette chaire (la chaire de *physique théorique* étant confiée à... un expérimentateur, Eugène Bloch, qui est cependant très intéressé par les nouvelles théories physiques), et enfin, à partir de 1928, l'installation dans le cadre de l'Institut Henri Poincaré d'une chaire de *théories physiques*, qui revient à Léon Brillouin puis à Louis de Broglie, doublée d'une maîtrise de conférence (Louis de Broglie puis Francis Perrin). Au total, les étudiants de Sorbonne désireux de s'introduire aux nouvelles disciplines de la physique ont la possibilité de suivre les cours de noms aussi prestigieux que Jean Perrin et Marie Curie, Léon Brillouin (puis Francis Perrin, qui enseigne les statistiques quantiques) ou encore Louis de Broglie. Ils peuvent notamment bénéficier des cours sur la mécanique ondulatoire d'Eugène Bloch et de Louis de Broglie. Cependant, seul le cours d'Eugène Bloch, qui reprend les développements des théories quantiques, de l'ancienne théorie des quanta de Bohr et Sommerfeld jusqu'à la mécanique ondulatoire et la mécanique des matrices, peut être regardé comme un cours d'introduction systématique aux théories quantiques. Ce cours a été publié en 1930<sup>67</sup>. Il se contente de présenter les nouvelles théories et ne va pas très loin dans leurs applications. En outre, ce cours ne donnait lieu à aucun examen et n'était pas intégré dans le cadre d'un C.E.S. Quant aux cours de Louis de Broglie, ils sont d'un niveau beaucoup trop élevé pour des étudiants débutant leurs études de physique et sont davantage destinés à des étudiants très avancés, voire des chercheurs confirmés. En ce qui concerne la théorie de la relativité, elle n'a semble-t-il pas

---

<sup>66</sup> Certificat d'études supérieures.

<sup>67</sup> Bloch, Eugène (1930).

fait l'objet d'enseignements systématiques durant toutes ces années à la Sorbonne, en faisant toutefois quelques apparitions épisodiques (dans les cours d'Elie Cartan, d'Eugène Bloch, et de Louis de Broglie<sup>68</sup>).

La licence s'obtient par la validation de trois C.E.S. dont le choix est laissé libre à l'étudiant. Pour autant, certains C.E.S. sont obligatoires pour les étudiants désirant obtenir la licence d'enseignement : *mathématiques générales* ou *Math, Physique, Chimie* ; *Physique générale* et *Chimie générale*. Cela a pour conséquence la très grande participation des étudiants à ces certificats, au détriment des autres<sup>69</sup>. Dans les faits, la présence d'une poignée de cours sur la physique moderne n'a donc que très peu d'incidences sur une grande majorité des étudiants. Seulement 5% en moyenne au cours des deux décennies d'entre-deux-guerres s'inscrivent dans les C.E.S. de *chimie-physique et radioactivité* de Jean Perrin et Marie Curie et de *probabilité et physique mathématique* organisés par les théoriciens et les mathématiciens de l'Institut Henri Poincaré. Le C.E.S. de physique qui bénéficie du plus grand nombre d'inscrits est celui de physique générale, dont l'enseignement est assuré notamment par Fabry et Cotton (le taux d'étudiant de licence de physique qui s'inscrit à ce C.E.S. progresse de 50% au début des années 1920 à 60% à la fin des années 1930).

En raison de ses liens institutionnels avec la Faculté des sciences et le Collège de France, le cas de l'ENS est plus délicat à analyser. Les étudiants de l'ENS les plus intéressés par la physique théorique avaient la possibilité de suivre les rares cours qui y étaient dédiés à la Sorbonne, ou encore les cours de Langevin et de Brillouin (père puis fils) au Collège de France. Cependant, ces cours n'étaient pas en lien avec le programme d'agrégation : les étudiants de l'ENS n'avaient donc aucune obligation de s'initier aux théories modernes, même si certains cours donnés à l'ENS en abordaient quelques éléments (le cours d'Henri Abraham en 1923 aborde par exemple les transformations de Lorentz, mais il le fait sur un ton assez sceptique<sup>70</sup>). En raison de ce caractère libéral, la partie d'une promotion qui désirait seulement obtenir l'agrégation afin de devenir professeur de lycée n'était nullement dans l'obligation de s'initier aux nouvelles théories. C'est seulement par pure intérêt ou par désir de faire de la recherche que l'autre partie s'en informait<sup>71</sup>. À noter qu'à partir de 1934, Louis de Broglie devient chargé de conférences à l'ENS et donnera des conférences notamment sur la mécanique analytique, la physique statistique, la relativité, l'électrodynamique et les théories quantiques<sup>72</sup>.

La physique moderne (notamment la relativité et l'atome de Bohr) obtient une petite place dans le cadre – et souvent en complément – des cours de physique de certains professeurs de l'Ecole Polytechnique au début des années 1920. L'introduction de la théorie de la relativité est initiée par Jean Becquerel qui lui consacre un cours à part entière durant l'année 1920-1921. Elle fait également l'objet de chapitres dans le cours d'électricité de Perot (de 1921 jusqu'en 1926), dans le cours d'optique de Lafay (1922-1923 et 1925-1926) et dans le cours de mécanique de Painlevé (1924-1925). Les discussions des professeurs sur les programmes montrent toutefois que les théories modernes et

---

<sup>68</sup> Voir les livrets de l'étudiant (Académie de Paris (1920-1940)). Voir également Biezunski (1983), pp. 257-273. À noter que c'est à travers l'étude de la mécanique quantique relativiste que la relativité apparaît dans les cours de Louis de Broglie. Cette théorie ne constitue donc pas le savoir ciblé et est considérée comme connue.

<sup>69</sup> Les statistiques concernant les C.E.S. sont disponibles dans les rapports annuels du doyen aux *Annales de l'Université de Paris*. Voir également l'étude de Pestre (1984), pp. 20-23.

<sup>70</sup> Biezunski (1983), p. 284.

<sup>71</sup> Voir également Jean Langevin (1963).

<sup>72</sup> Archives de l'Académie des sciences (42J/boîte 5).

surtout la pertinence de les enseigner à l'Ecole font débat dès le milieu des années 1920 et elles tendent à disparaître complètement de l'enseignement à partir de 1926 et jusqu'en 1936, date à partir de laquelle elles sont réintroduites par Léauté puis par Leprince-Ringuet<sup>73</sup>. Étudiant à Polytechnique pendant les années 1920, Ullmo se remémore l'enseignement de la façon suivante :

« We had at the time Perot as professor. And Perot was a very good man; he tried to put in a little new physics, but he knew nothing about it, so the few pages he gave to Bohr's atom were quite false. They meant nothing, in fact. The only one who was really interested in the new physics was Becquerel, who was an examiner in the Ecole Polytechnique and who had been professor for two years between 1920 and '22. But these were on relativity theory. [...] Afterwards relativity and quantum physics were out of the question<sup>74</sup>. »

Une introduction à l'étude de la mécanique quantique ne sera pas proposée avant les années 1950. Même après la seconde guerre mondiale, l'enseignement de la physique moderne à Polytechnique laisse encore, selon Jacques Friedel, bien à désirer :

« Les cours de physique de Léauté – spécialiste des goudrons - laissaient plus à désirer [que les cours de mathématiques de Valiron et Julia], comme aussi ceux de chimie. Si j'ai appris - tout seul, et sur un livre de mon père - ce qu'était la relativité restreinte, il n'y avait aucune approche sérieuse de la mécanique quantique. La chimie était une compilation ennuyeuse digne du XIX<sup>e</sup> siècle. Enfin, nous étions abreuvés d'un cours gigantesque de mathématiques appliquées de Brad, certainement très intéressants pour les spécialistes, mais dont je n'ai presque rien retenu sauf des bribes de mécanique qui, je dois le dire, m'ont bien servi<sup>75</sup>. »

Enfin, un lieu privilégié dans lequel on peut s'introduire à la physique théorique moderne reste le Collège de France. De nombreux physiciens ont témoigné de l'importance prise par les cours de Langevin pour l'introduction des théories quantiques et relativistes en France<sup>76</sup>. À ces cours, on peut par la suite également ajouter ceux de Léon Brillouin<sup>77</sup>, (1931-1949) notamment sur les théories du solide. Ces cours, qui sont d'un très haut niveau, accueillent cependant uniquement les chercheurs<sup>78</sup> et les étudiants les plus motivés.

En conclusion, même s'il serait exagéré de dire qu'aucun cours de physique théorique moderne n'est enseigné durant ces années en France, ils restent suspendus à l'initiative de quelques professeurs et n'offrent pas la garantie d'une introduction systématique et spécifique à ces nouvelles matières. Le moyen le plus courant de s'introduire à celles-ci reste les manuels, et notamment les manuels étrangers.

### **L'enseignement de la physique moderne à travers les manuels de physique générale**

---

<sup>73</sup> Biezunski (1983), pp. 242-252.

<sup>74</sup> Ullmo (1963).

<sup>75</sup> Friedel (1994), p. 155

<sup>76</sup> Par exemple Brillouin (1962), de Broglie (1947-A), Ullmo (1963), Bauer (1963).

<sup>77</sup> Bien que très ouvert à la physique moderne, Marcel Brillouin, qui précéda son fils comme titulaire de la chaire de physique théorique du Collège de France, enseigna essentiellement des sujets classiques, comme la physique du globe, la capillarité, la déformation des solides ou la propagation des ondes (voir le document *Trente ans d'enseignement au Collège de France, 1900-1931, Résumé des leçons de chaque année scolaire*. Archives de l'Académie des sciences, fond Marcel Brillouin).

<sup>78</sup> D'après Jean Ullmo, Louis de Broglie participait aux cours de Paul Langevin encore après avoir soutenu sa thèse sur la dualité onde-corpuscule. Ullmo (1963).

Étant donné le peu d'influence qu'ont obtenu les cours spécifiquement consacrés aux théories modernes – notamment à la Sorbonne – Pestre a souligné l'importance de regarder de plus près le contenu des leçons de physique générale, qui représentent effectivement le socle de connaissances communes pour chaque étudiant en physique. Pour ce faire, Pestre a eu recours aux publications des cours des professeurs de physique générale de la Sorbonne, lorsque ceux-ci ont effectivement publié (c'est le cas de Fabry, dont il a étudié le cours de l'École Polytechnique qui recoupe, tout en étant plus complet, celui donné à la Sorbonne). Il a complété son étude par l'analyse des manuels qu'il a jugés les plus représentatifs de l'enseignement général de physique en France. Ses critères de sélection ont été la réputation et la position institutionnelle des auteurs et le nombre de rééditions des manuels en question. Le choix a été porté sur les manuels de Georges Bruhat. Ces deux manuels ont notamment été comparés à des manuels étrangers jugés par Pestre de niveau pédagogique équivalent : ils ont pour auteurs Planck, Drude ou encore Millikan. L'objectif de l'étude est le suivant :

« elle consiste à utiliser les cours rédigés pour les étudiants comme révélateurs d'une vision sous-jacente de la science et des hiérarchies qu'on pense devoir constituer d'une part, comme indices des principes méthodologiques qu'on privilégie d'autre part. Cette étude ne vise donc pas à définir si par exemple la physique française est « en retard » par rapport à d'autres, elle tend plutôt à mettre en évidence les principes qui sont à la base de la présentation et qui signalent une manière de concevoir la science en tant que telle. »<sup>79</sup>

Les principaux traits qu'arrive à dégager Pestre des manuels français sont :

-Un découpage « classique » de la physique, essentiellement hérité du XIX<sup>e</sup> siècle, avec une grande importance accordée à l'optique et à l'électricité. Les nouvelles approches de la physique (théories statistiques de la matière, théorie atomique de Bohr...) sont peu abordées (voir plus bas) et, lorsqu'elles le sont, elles ne font pas l'objet de présentations systématiques et autonomes, mais sont éparpillées dans les différentes parties du cours. Autrement dit, elles viennent compléter un corpus de savoirs organisés de façon datée au lieu de le restructurer. Selon Pestre, ce plan traditionnel d'exposition « semble gêner la mise en évidence des bouleversements introduits par les théories nouvelles et freiner l'émergence des champs neufs ouverts par la recherche des dernières années, voire décennies »<sup>80</sup>.

-Un mode d'exposition « historico-inductif » prédomine. Par « exposition historico-inductive », Pestre entend un mode d'exposition qui privilégie l'ordre historique des découvertes des lois physiques, avec la présentation des phénomènes ou des expériences qui ont permis (selon cette façon de voir les choses) de les établir d'une manière inductive. Ce mode d'exposition s'oppose à d'autres façons de présenter la physique que l'on rencontre davantage dans les manuels étrangers étudiés : un mode de présentation « constructif »<sup>81</sup>, qui s'appuie par exemple sur les hypothèses les plus modernes sur la constitution microscopique de la matière comme base d'une compréhension des lois macroscopiques (souvent historiquement découvertes antérieurement), ou bien encore un mode de présentation « déductif », qui se base sur l'énoncé des principes de base de la physique pour remonter aux lois plus particulières. Pestre aperçoit derrière ce choix français une conception des sciences

---

<sup>79</sup> Pestre (1984), p. 33.

<sup>80</sup> *Ibid.* p. 36

<sup>81</sup> Ce qualificatif n'est pas de Pestre, mais la description qu'il fait de ce type de représentation de la physique trouve un certain écho avec ce qu'Einstein appelle les théories constructives (voir au chapitre 2).

empreintes de positivisme, très soucieuse de dériver les lois de la physique directement de l'expérience plutôt que des les intégrer dans un complexe théorique hautement cohérent.

-Ce positivisme se manifeste particulièrement dans le traitement de la thermodynamique. Pestre met l'accent sur le peu de place accordé à la présentation des explications mécaniques de la chaleur (théorie cinétique des gaz, thermodynamique statistique) et à la méfiance que ces explications suscitent lorsqu'elles sont présentées.

-La place des nouvelles théories reste modeste. Ce constat d'ensemble peut néanmoins être nuancé. La théorie de la relativité n'est globalement pas abordée ; on y fait tout juste quelques références. La même chose peut être dite à propos de la mécanique quantique, toujours désignée sous le terme de « mécanique ondulatoire ». L'ancienne théorie des quanta est en revanche bien présente, mais on ne la présente pas de façon autonome : elle est en effet incorporée dans différents chapitres. Selon Pestre, ce constat traduit le fait que l'ancienne théorie des quanta est avant tout un ensemble de règles sans vraiment de cohérence théorique interne, mais qui possèdent une prise directe sur l'expérience. Pour des professeurs qui conçoivent avant tout la physique comme une science expérimentale, l'ancienne théorie des quanta apparaît ainsi utile, à l'inverse de la relativité et de la mécanique ondulatoire dont l'intérêt suscité semble surtout d'ordre culturel et philosophique. En outre, selon Pestre, ces théories continuent de susciter du scepticisme. Des théories qui reposent sur d'autres structures logiques que la physique classique — ce qui réclame donc une mise en cause de cette dernière — et dont les gains pour le travail expérimental reste relativement modeste ne peuvent que provoquer une certaine perplexité quant à la question de la place à leur accorder dans l'enseignement. Pour Pestre, les conséquences de cet état de fait peuvent être très fâcheuses :

« On ne peut que s'inquiéter pour les étudiants et les futurs chercheurs : jamais ils n'apprendront dans leurs cours, leurs manuels, que la physique est en pleine mutation, qu'épistémologiquement elle se transforme. Ce retard, cette absence du théorique ne pourra qu'être une constante de la physique française des années 20 et même 30<sup>82</sup>. »

On voit donc que Pestre parvient à tirer de cette étude un portrait épistémologique des concepteurs de ces manuels que l'on peut résumer ainsi : vision sclérosée de la physique, conservatisme, inductivisme et méfiance du théorique.

Discutons de l'opportunité de tirer de telles conclusions à partir de ce genre d'études. Tout d'abord, notons que Pestre recoupe un certain nombre d'affirmations avec des témoignages d'anciens étudiants de l'époque, ce qui renforce leur fiabilité. En effet, les témoignages sont assez abondants pour confirmer l'obsolescence des cours professés à cette époque à la Sorbonne<sup>83</sup> ainsi que le fait qu'un certain nombre de professeurs ont conservé très longtemps une méfiance vis-à-vis des théories nouvelles comme la relativité. Il me semble en revanche qu'on est souvent trop tenté de tirer de fermes conclusions à partir d'éléments qui ne sont pas forcément si significatifs. Ainsi on peut par exemple objecter à Pestre que les choix de présenter telles théories au détriment des autres, et de telle ou telle manière, relèvent également de choix pédagogiques qui ne reflètent pas nécessairement si profondément les conceptions scientifiques des professeurs. Bien entendu, Pestre n'ignore pas cette objection, mais la rejette de la façon suivante :

---

<sup>82</sup> Pestre (1984), p. 53

<sup>83</sup> Nous pouvons encore invoquer les témoignages de Brillouin (1962), Bauer (1963) ou Ullmo (1963).



« Quant à l'argument pédagogique - il faut commencer par le début, la physique classique - il serait à notre avis plutôt de l'ordre de la justification et masquerait en réalité une attitude plus profonde. Intrinsèquement, par exemple, la théorie de la relativité ne présente pas plus de difficultés que maintes théories classiques. Le problème nous semble être avant tout d'ordre mental, le refus de situer dans l'a priori du bon sens et non dans la complexité technique ou pédagogique. »<sup>84</sup>

Il faut cependant se rappeler à quels étudiants s'adressent les cours de Fabry et Bruhat. Ce sont des cours de physique générale qui s'adressent à des étudiants de niveau licence et dont les objectifs ne sont pas nécessairement de s'orienter vers de la recherche en physique théorique. Deux éléments essentiels doivent être pris en compte :

-La physique théorique n'est pas encore institutionnalisée en France pendant les années 1920 (mais l'est-elle vraiment d'avantage ailleurs, en Grande-Bretagne ou en Italie par exemple, et à l'exception de l'Allemagne ?). De ce fait, très peu d'étudiants sont en mesure d'imaginer l'opportunité d'une carrière en physique théorique, et les professeurs peuvent douter de la pertinence de mobiliser le temps nécessaire à l'apprentissage de théories dont la maîtrise n'apparaît alors pas indispensable à un bon travail de recherche dans les laboratoires. Certes, cette attitude contribue elle-même au fait que la physique théorique ne prenne pas son essor, mais elle n'est néanmoins pas nécessairement signe d'une méfiance épistémologique envers le théorique.

-Le succès du C.E.S. de physique générale à la Sorbonne s'explique en grande partie à cause de son caractère obligatoire dans l'obtention d'une licence d'enseignement. Or, la physique moderne n'est pas énormément plus enseignée aujourd'hui aux aspirants à l'enseignement dans le secondaire qu'elle ne l'était à l'époque<sup>85</sup>. Cela n'a sans doute pas toujours été ainsi<sup>86</sup>, mais cela montre que l'argument pédagogique, qu'il soit ou non réellement convaincant, est néanmoins utilisé en toute sincérité par des personnes qui ne refusent par ailleurs pas forcément les nouvelles idées<sup>87</sup>. On verra par la suite que ce même argument sera utilisé par Louis de Broglie lui-même, qui n'a pourtant jamais été hostile à ce que la physique moderne se diffuse davantage.

Il apparaît, malgré toutes ces réserves, que les analyses de l'enseignement de physique générale par Pestre permettent de confirmer certaines tendances épistémologiques présentes dans la communauté des physiciens français, étant entendu qu'elles viennent recouper certaines informations que l'on peut dégager par ailleurs (notamment les témoignages d'anciens élèves). Il semble ainsi évident qu'un certain positivisme existe et que l'attitude de beaucoup de physiciens vis-à-vis des théories modernes demeure méfiante. Toutefois, les erreurs dans lesquelles il ne faut pas tomber sont :

1) ne pas généraliser à toute une communauté des traits que l'on peut prêter à une poignée de physiciens, même si ceux-ci disposent d'une situation institutionnelle importante qui en fait des personnes particulièrement représentatives de la physique française.

---

<sup>84</sup> Pestre (1984), p. 54

<sup>85</sup> Pour donner un exemple, les étudiants à la Faculté des sciences de Lyon ne commencent sérieusement à étudier la physique moderne qu'à partir de la 2<sup>ème</sup>, voire la 3<sup>ème</sup> année de Licence, et principalement à ceux qui choisissent de se spécialiser en physique pure. Les étudiants aspirant aux métiers de l'enseignement dans le secondaire choisissent habituellement le parcours « physique-chimie » dans lequel la part de physique moderne est beaucoup plus réduite (aucun cours de relativité ou de physique quantique obligatoire).

<sup>86</sup> Par exemple, lorsqu'on étudie les manuels de terminal datant d'une vingtaine d'années, des parties consacrées à la présentation de la physique moderne existent. En revanche, exceptée la présentation des lois de désintégration radioactive ou la formule  $E=mc^2$ , la place réservée à la physique moderne il y a une dizaine d'années était inexistante.

<sup>87</sup> On peut en effet penser qu'aujourd'hui, les réticences envers les théories quantiques et relativistes ont largement disparu dans le milieu de l'enseignement de la physique universitaire ou du secondaire.

2) ne pas sur-interpréter certains éléments (par exemple l'absence de cours de physique moderne dans les programmes des cours de physique générale) pour en faire des signes évidents de l'existence d'un blocage par rapport aux nouvelles théories.

À mon sens, dans la question de la diffusion des nouvelles théories physiques en France, l'important n'est pas tant le contenu des cours de physique générale, mais la quasi-absence de cours complémentaires spécifiquement portés sur la physique moderne. Et il se pourrait que l'élément décisif ne soit pas tant la méfiance vis-à-vis de telles théories (elle n'est pas partagée par tout le monde, comme nous le verrons par la suite), mais l'absence de prise de conscience de leur utilité.



# Chapitre II - Louis de Broglie : retour sur le parcours d'un physicien

Nous revenons dans ce chapitre sur la carrière scientifique de Louis de Broglie. Je retrace dans un premier temps ses contributions à la découverte de la mécanique ondulatoire, je décris ensuite son ascension institutionnelle et je tente enfin de dresser un portrait scientifique et épistémologique de ce physicien.

## I- L'entrée dans la carrière scientifique

### 1- La formation

Louis de Broglie est un physicien singulier à plus d'un titre. Relativement isolé des réseaux de la physique théorique internationale durant toute sa carrière malgré le grand prestige dont il bénéficie, originaire d'un milieu aristocratique<sup>88</sup>, son originalité peut également se déceler dès sa formation de physicien. Contrairement à la plupart des physiciens français de sa génération, de Broglie n'a fait aucune grande école. Sa vocation scientifique a même été relativement longue à se dessiner. Destiné selon les traditions familiales à poursuivre une carrière littéraire, historique ou politique, il obtient une licence d'histoire politique à 19 ans et s'apprête à se lancer dans une thèse en histoire du Moyen Age. Il se lasse cependant de la discipline et se réoriente un temps vers le droit. Au même moment, il fait la connaissance et se passionne pour les écrits d'Henri Poincaré : *La science et l'hypothèse*, et *La valeur de la science*<sup>89</sup>. C'est le tournant pour les sciences qui s'annonce. Quelques années auparavant, son frère aîné, Maurice de Broglie, avait donné l'exemple en ayant la hardiesse de rompre avec les traditions familiales et épouser une carrière de scientifique. Il parvient toutefois à un compromis avec sa famille à la suite du décès de son grand-père en 1901<sup>90</sup>. Il acceptera le mariage que lui propose sa famille avec la fille d'une des familles fortunées du moment (Camille de Rochetaillée), en échange de quoi il pourra poursuivre sa carrière scientifique et même bénéficier de la fortune de sa belle-famille pour installer un laboratoire privé dans un hôtel que sa belle-mère avait acheté, 27 rue Chateaubriand dans le VIII<sup>e</sup> arrondissement. Maurice prépare une thèse de physique au Collège de France auprès de Paul Langevin sur *les centres électrisés de faible mobilité dans les gaz*<sup>91</sup> et la soutient en 1908. En 1911 se tient le premier congrès Solvay à Bruxelles. Désigné secrétaire du Conseil, Paul Langevin

---

<sup>88</sup> Voir à ce sujet Nye (1997).

<sup>89</sup> Les éléments biographiques de Louis de Broglie peuvent se trouver par exemple dans les témoignages de son frère Maurice de Broglie (1953), de sa sœur Pauline, Comtesse de Pange (1962, 1965, 1968), dans les notices autobiographiques de Louis de Broglie (par exemple Louis de Broglie (1953-A)) ou encore dans la biographie écrite par Georges Lochak (1992).

<sup>90</sup> Wheaton (1994).

<sup>91</sup> Maurice de Broglie (1908).

invite Maurice à le seconder dans la rédaction des procès-verbaux. C'est ainsi que Louis de Broglie se retrouve parmi les premiers lecteurs des comptes rendus des séances du prestigieux conseil.

Louis de Broglie raconte à de nombreuses reprises l'importance que prirent pour lui ses lectures qui le mirent directement en contact avec les toutes nouvelles branches de la physique, et notamment l'épineux problème des quanta<sup>92</sup>. Il raconte encore, dans une allocution prononcée<sup>93</sup> en 1972 pour son quatre-vingtième anniversaire, qu'ayant préparé peu après le certificat de mécanique rationnelle, il s'aperçut que les théories d'Hamilton et Jacobi avaient un rapport avec le problème de la coexistence des ondes et des particules. Il savait qu'Hamilton avait déjà remarqué l'analogie entre les lois de la mécanique et la propagation des rayons lumineux, mais se demandait si cette analogie, que l'on croyait alors simplement formelle, n'avait pas un contenu physique beaucoup plus profond. Il décide alors de travailler sur le sujet après avoir obtenu sa licence, mais en 1913, il doit accomplir son service militaire. Or, en 1914, la guerre éclate ! Sa qualité de licencié ès science lui permet cependant d'échapper au front : il est mobilisé durant la guerre aux pieds de la Tour Eiffel, dans le service radiotélégraphique sous la direction du Général Gustave Ferrié, grand pionnier de la TSF (télégraphie sans fil). Même si cette période constitue un contretemps important dans la trajectoire de Louis de Broglie, elle lui permet néanmoins de vivre une première expérience d'ouverture sociale sur le monde<sup>94</sup>. Elle fournit également l'opportunité pour le futur physicien de s'initier à un travail qui peut avoir certaine ressemblance avec le travail de laboratoire, proche de la manipulation concrète de la matière. C'est ainsi que Louis de Broglie aimera déclarer, d'après Lochak :

« Quand on s'est sali les mains [...] à faire démarrer les gros alternateurs qui servaient à l'époque aux émissions de radio, il n'est plus si facile de croire qu'une onde ne puisse être qu'une probabilité de présence. »<sup>95</sup>

Après sa démobilisation en 1919, Louis de Broglie intègre le laboratoire de son frère, et perfectionne sa formation en physique en suivant notamment les cours de Paul Langevin au Collège de France. Louis de Broglie apprend donc à bonne école. D'une part, le laboratoire de son frère constitue, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, un des lieux privilégiés en France pour l'étude de nouveaux champs de la physique (phénomènes d'ionisation, rayons X, effet photo-électrique, mouvement brownien). Or, les expériences qui s'y effectuent persuadent assez vite les membres du laboratoire - et notamment le premier d'entre eux, Maurice de Broglie - de la nécessité de prendre au sérieux l'hypothèse des quanta de lumière<sup>96</sup>, étape essentielle vers la thèse de la dualité onde-corpuscule. D'autre part, les cours de Paul Langevin sont avant-gardistes par rapport à tout ce qui se fait en France à cette époque (voir le chapitre précédent) : les théories statistiques des propriétés de la

---

<sup>92</sup> Voir par exemple Louis de Broglie (1953-A).

<sup>93</sup> Archives de l'Académie des sciences (42J/boîte 30), de Broglie (1972).

<sup>94</sup> Les seules personnes qu'il tutoiera au cours de sa vie seront, d'après Lochak, rencontrées pendant cette expérience (George Lochak (1992), p. 67). Cette information est corroborée par le fait que je n'ai pas trouvé une seule lettre de correspondance dans laquelle Louis de Broglie ne vouvoyait pas ses correspondants – que ce soit ses élèves, ses collègues ou ses amis.

<sup>95</sup> Lochak (2004), p. 761.

<sup>96</sup> On rappelle ici que, contrairement à une opinion très répandue – et qui provient de la traditionnelle présentation de l'atome de Bohr, avec le quantum de lumière censé être émis pendant un « saut quantique », ou encore de l'obtention du prix Nobel par Albert Einstein en 1921 pour son explication de l'effet photo-électrique – que l'hypothèse des quanta de lumière n'était pas universellement admise au début des années 1920, c'est-à-dire avant la découverte de l'effet Compton. En 1924 encore, Bohr, en compagnie de Kramers et de Slater, proposait une théorie du rayonnement des atomes (la fameuse théorie BKS) qui se passait de cette hypothèse. Voir par exemple Wheaton (1983).

matière, la relativité et la physique des quanta y sont enseignées. Or, la maîtrise des théories statistiques et de la relativité s'avère déterminante dans ses premiers travaux.

## 2- Les premiers travaux de Louis de Broglie

Le travail de Louis de Broglie dans le laboratoire de son frère consiste essentiellement en l'interprétation théorique des données expérimentales obtenues par son frère et ses assistants. Selon Lochak, Louis travaille en solitaire dans le laboratoire de son frère et prend part aux travaux seulement si on le consulte sur des points théoriques. Jean-Jacques Trillat, qui était membre du laboratoire, raconte à Lochak qu'il saluait tout le monde chaque matin avant de s'enfermer dans son bureau pour réfléchir à un travail théorique qu'il avait entrepris sans que personne, dans le laboratoire, pas même son frère, ne sache de quoi il s'agissait<sup>97</sup>.

Cet isolement n'est cependant pas total. S'il développe sans doute en solitaire les idées qui mèneront à sa thèse, il participe néanmoins au travail de réflexion du laboratoire, comme en atteste les articles publiés en collaboration avec son frère ou Alexandre Dauvillier.

### Travail d'un théoricien de laboratoire

Sa première publication paraît aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences* le 8 mars 1920 et porte sur quelques modifications des formules de l'atome de Bohr (prenant notamment en compte la présence de plusieurs électrons) et leur confrontation avec l'expérience<sup>98</sup>. Suivent une dizaine d'articles publiés seul ou en compagnie de Dauvillier, essentiellement sur l'interprétation théorique des spectres d'absorption des rayons X, la structure électronique des atomes ou encore le spectre d'émission des électrons atomiques lors d'une ionisation. Ses travaux ont un aspect particulier dans l'œuvre de Louis de Broglie en ceci qu'ils restent très proches des données expérimentales. Les spéculations sont limitées et de Broglie se sert essentiellement de théories, quand ce n'est pas uniquement de formules, déjà disponibles, pour confronter les valeurs calculées directement à l'expérience.

Afin d'illustrer aussi bien les caractéristiques de ses premiers travaux et les problèmes physiques qu'il aborde au sein du laboratoire de son frère, deux articles me semblent assez représentatifs de cette période.

Le premier concerne une utilisation du modèle de l'atome de Bohr dans la discussion de la valeur de l'énergie des électrons émis lors d'une ionisation<sup>99</sup>. De Broglie commence par rappeler les points importants de la théorie de Bohr :

« Le modèle d'atome de Bohr, dont le succès pour l'explication des spectres lumineux a été si remarquable, comporte une charge centrale positive autour de laquelle gravitent des électrons sur certaines trajectoires stables qui ont reçu les noms d'anneaux  $K, L, M$ , etc. en allant du centre vers la périphérie. Pour extraire un électron d'un de ces anneaux il faut lui fournir une énergie  $W_K, W_L$ , etc. ».

---

<sup>97</sup> Lochak (1992), p. 76.

<sup>98</sup> Louis de Broglie (1920-A).

<sup>99</sup> Louis de Broglie (1920-B).

De Broglie en déduit alors l'énergie d'un électron appartenant à la couche  $i$  si celui-ci est éjecté de l'atome par un quantum lumineux de fréquence  $\nu$  ( $E=h\nu-W_i$ ). Il discute ensuite le cas où le rayonnement excitateur ou ionisant serait continu mais borné à une fréquence supérieure. Dans ce cas, il note que les « spectres corpusculaires » seraient formés de bandes à bord net du côté des grandes vitesses. Enfin, dans le cas où plusieurs types d'éléments seraient présents, de Broglie note la possibilité pour que l'émission de rayons X de fluorescence d'un premier élément puisse fournir l'énergie nécessaire à l'extraction d'un électron du second élément et en déduit les conséquences sur les spectres d'émissions corpusculaires observés. De Broglie se pose alors la question :

« Dans quelle mesure l'expérience justifie-t-elle ces prévisions ? »

Il discute alors d'un certain nombre d'observations expérimentales qui accréditent ou non les prévisions théoriques, et conclut :

« nous avons voulu signaler les conséquences qui paraissent rationnellement se déduire de l'atome de Bohr, ainsi que l'état actuel de la comparaison entre l'expérience et la théorie sur ces points à la fois délicats et importants. »

Dans ce cas précis, nous avons donc affaire à un travail théorique qui consiste à utiliser un modèle théorique disponible (le modèle de Bohr), à l'appliquer à des cas particuliers, et à discuter de sa concordance avec l'expérience.

L'autre exemple que nous choisirons est un travail écrit en collaboration avec Alexandre Dauvillier, dont l'objet, tel que présenté par les auteurs, est « de confronter les indications physico-chimiques concernant la structure électronique des éléments avec celles qui sont fournies par l'étude de leurs spectres de rayon X »<sup>100</sup>. Les auteurs rentrent dans le vif du sujet en proposant un tableau représentant le remplissage électronique des différentes couches pour quelques atomes. Ils se concentrent alors sur l'élément Uranium et indiquent que les résultats des études spectroscopiques ne mettent en évidence que l'existence de cinq couches occupées, quand le tableau en propose sept (les couches  $K, L, M, N, O, P, Q$ ). Il semblerait donc selon ces données spectroscopiques que les couches  $P$  et  $Q$  soient inoccupées. Les auteurs proposent alors une interprétation théorique de l'énigme. L'absence des électrons de la couche  $Q$  s'explique par l'état cristallisé dans lequel se trouve l'uranium constituant l'anticathode (il apparaît sous forme d'ion  $U^{+++++}$ , et les 6 électrons formant la couche  $Q$  ne sont donc pas présents), alors que l'absence des électrons de la couche  $P$  s'expliquerait par la très forte température présente dans le foyer de l'anticathode, responsable de l'ionisation des électrons du niveau  $P$ .

On part donc ici d'une énigme expérimentale à interpréter que l'on résout en mobilisant une hypothèse particulière (ionisation due à l'état cristallin et à la haute température présente) dans le cadre d'un modèle disponible (toujours le modèle de Bohr).

En somme, les premiers travaux de Louis de Broglie sont ceux d'un théoricien de laboratoire qui mobilise la théorie des quanta pour expliquer ou anticiper des observations qui concernent directement ses collègues expérimentateurs. On est loin de l'image accolée à Louis de Broglie et largement répandue aujourd'hui, d'un physicien complètement coupé des préoccupations des expérimentateurs. On est également bien éloigné de la *physique mathématique* décrite au chapitre

---

<sup>100</sup> De Broglie, Dauvillier (1921).

précédent. Mais il faut admettre que ces travaux font exception dans la carrière de Louis de Broglie, qui commence à changer d'orientation à partir de 1923.

Je finirai ce tour d'horizon de ces premiers travaux en relatant deux événements qui ont, selon Raman et Forman<sup>101</sup>, pu avoir une incidence – plutôt fâcheuse, il faut bien le dire - sur la réputation de Louis de Broglie parmi différents *leaders* de la physique internationale, et donc sur le processus de diffusion de son œuvre.

### Louis de Broglie et le principe de correspondance

Nous avons vu que ces premiers travaux ont été l'occasion pour Louis de Broglie d'appliquer à des problèmes particuliers des théories venant de l'étranger, et notamment du groupe de théoriciens gravitant autour de Niels Bohr. Or, n'ayant aucune relation directe avec ce groupe, Louis de Broglie n'a pu se former à ces théories qu'à travers des lectures d'articles, ce qui a rendu parfois leur utilisation assez particulière. Un tel exemple peut être observé dans l'application par de Broglie du principe de correspondance de Bohr<sup>102</sup>.

Le principe de correspondance est un outil heuristique, forgé par Niels Bohr, qui sert à exploiter au maximum les informations pertinentes fournies par l'électrodynamique classique dans l'optique de fournir des prévisions statistiques (liées aux probabilités de transition quantique) dans le cadre de l'ancienne théorie des quanta. L'électrodynamique classique permet de prévoir le rayonnement émis par une particule chargée en fonction de sa trajectoire (la variable pertinente étant l'accélération). On peut ainsi obtenir l'intensité lumineuse  $I(\nu)$  émise par un électron pour chaque fréquence  $\nu$ . En revanche, le mécanisme d'émission de la lumière semble entièrement différent dans la théorie quantique. L'émission d'un rayonnement lumineux de fréquence  $\nu_{nm}$  intervient de façon discontinue lorsqu'un électron « saute » d'une trajectoire  $n$  correspondant à une énergie  $E_n$  à une trajectoire  $m$  correspondant à une énergie  $E_m = E_n - h\nu_{nm}$ . L'idée de Bohr est de relier l'intensité classique  $I(\nu)$  du rayonnement émis par l'électron parcourant la trajectoire  $n$  à la probabilité quantique d'émission d'un quantum  $h\nu_{nm}$  (correspondant à la probabilité de transition  $A_{nm}^n$  entre l'état  $n$  et l'état  $m$ ). Si on suppose qu'il y a une équivalence statistique entre le rayonnement classique d'un nombre  $N$  d'électrons parcourant la trajectoire  $n$  et le rayonnement quantique d'un nombre identique d'électrons se trouvant sur cette même orbite dans leur état initial, on peut alors en effet facilement obtenir la relation entre  $I(\nu)$  et  $A_{nm}^n$ . Afin de calculer l'intensité classique  $I(\nu)$  du rayonnement, on peut décomposer la trajectoire de l'électron en série de Fourier et calculer l'énergie émise par unité ( $dW/dt$ ) de temps pour chaque mode. Pour un mode d'émission considéré, on devrait ainsi obtenir la relation :

$$\frac{dW}{dt} = h\nu_{nm} A_{nm}^n$$

Tout en s'inspirant de ce principe, Louis de Broglie en fait une utilisation particulière en 1921, pour l'obtention des valeurs  $A_{nm}^n$  correspondant aux spectres de rayons X des atomes. Alors que la méthode traditionnellement employée par le groupe de Bohr est d'obtenir le mode de Fourier considéré par l'analyse de la trajectoire  $n$  et d'en déduire l'énergie du rayonnement classique pour

<sup>101</sup> Raman, Forman (1969).

<sup>102</sup> Louis de Broglie (1921).

obtenir le rayonnement quantique qui lui correspond, Louis de Broglie se contente d'affirmer l'hypothèse selon laquelle  $A_m^n$  aurait la forme suivante :  $\alpha(E_n - E_m)T$  (où  $T$  est la température), en justifiant cette égalité par la formule classique de l'énergie moyenne rayonnée par unité de temps par un oscillateur de fréquence naturelle  $\nu_{nm}$  en équilibre thermodynamique à la température  $T$  :

$$\frac{dW}{dt} = \frac{8\pi^2}{c^3} k \frac{e^2}{m} \nu^2 T$$

De Broglie reprend cette hypothèse dans un article plus important paru au *Journal de Physique* en 1922<sup>103</sup>. En 1923, Kramers publie un article qui fait le tour de la question de l'absorption des rayons X par la matière. On peut notamment y lire :

« An attempt to account for the observed law of absorption on the basis of our present views of the nature of X-Rays and of the structure of the atom has been made by L. de Broglie [...] His treatment of the problem, which at all point differs essentially from that followed in this paper, seems not to be consistent with the way in which the quantum theory at present is applied to atomic problems ».<sup>104</sup>

Raman et Forman commentent la citation : « for all its apparent mildness, [it] will be recognized as a Copenhagen euphemism for “nonsense” »<sup>105</sup>.

### **Hafnium vs Celtium**

Louis de Broglie et Alexandre Dauvillier sont directement rentrés en compétition avec Niels Bohr et son équipe dans l'étude théorique des spectres des rayons X, n'hésitant pas à apporter des modifications et des nouvelles hypothèses aux théories de Bohr<sup>106</sup>. Louis de Broglie a ainsi indirectement participé au conflit de priorité qui s'est installé entre Dauvillier et des physiciens de Copenhague à partir de 1923 à propos de la découverte (et du nom !) de l'élément 72, finalement nommé « Hafnium » (en référence au nom latin de Copenhague) et que de Broglie et Dauvillier persistait à nommer « Celtium » encore en 1924.

Tous ces événements firent en sorte, selon Raman et Forman, que Louis de Broglie ne devait pas jouir d'une très bonne réputation parmi les physiciens d'Europe centrale impliqués dans les problèmes de théorie quantique, retardant ainsi la diffusion des idées originales qu'il commence à développer à partir de 1923. Ajoutons, pour ce qui nous intéresse davantage ici, que cela ne devait pas en outre contribuer à favoriser son immersion au sein de la communauté physicienne internationale.

## **3- L'hypothèse de la coexistence des ondes et des corpuscules**

### **La statistique « corpusculaire » de la lumière<sup>107</sup>**

<sup>103</sup> De Broglie (1922-A).

<sup>104</sup> Kramers (1923), p. 840.

<sup>105</sup> Raman, Forman (1969).

<sup>106</sup> De Broglie, Dauvillier (1922).

<sup>107</sup> Voir également Darrigol (1993).



En 1922, deux articles annoncent les prémisses de la thèse de Louis de Broglie et marquent le moment à partir duquel son intérêt va se déplacer de l'étude théorique des spectres atomiques à l'étude de la structure de la lumière<sup>108</sup>.

L'idée la plus importante introduite est l'assimilation des quanta de lumière à de véritables corpuscules, auxquels s'applique de droit la dynamique relativiste des particules. De Broglie n'hésite pas à leur attribuer une masse  $m=h\nu/c$  qui ne s'annule pas au repos ( $m_0$  qu'il reconnaît extrêmement faible, et négligeable à toute fin pratique).

Dans un des deux articles, Louis de Broglie démontre qu'en considérant la nature de la lumière comme entièrement corpusculaire, le problème du corps noir revient à appliquer la statistique d'un gaz parfait constitué de particules relativistes de masse négligeable (de particules « ultra-relativiste » comme on dirait aujourd'hui). L'application de la thermodynamique statistique de Boltzmann-Gibbs permet alors de retrouver la loi de Wien. En divisant l'espace de phase en cellules de volume  $h^3$ , de Broglie obtient cependant une statistique différant d'un facteur 2 de la véritable loi de Wien, qui peut être attribué, comme Léon Brillouin lui fait remarquer, aux deux états que devrait pouvoir posséder un quantum de lumière et qui rendraient compte de la polarisation (ces deux états correspondant respectivement aux polarisations circulaires droite et gauche).

L'autre article est une tentative pour rendre compte de la loi de Planck en restant sur des bases corpusculaires. La thermodynamique statistique fournit pour la fluctuation d'énergie d'un système physique l'expression :

$$\overline{\varepsilon^2} = kT^2 \frac{dE}{dT}$$

Dans laquelle  $k$  est la constante de Boltzmann,  $T$  la température et  $E$  l'énergie du système en question. De Broglie remarque qu'une conception purement ondulatoire de la lumière (dans laquelle par exemple la lumière est décomposée en modes de vibration possédant à l'équilibre thermique chacun une énergie égale à  $kT$ ), l'énergie d'un rayonnement compris dans un volume  $V$  dont les fréquences sont comprises entre  $\nu$  et  $\nu + d\nu$  respecte alors la loi de distribution de Rayleigh :

$$E = \frac{8\pi k}{c^3} \nu^2 TV d\nu$$

Ce qui fournit une fluctuation statistique :  $\overline{\varepsilon^2} = \frac{c^3}{8\pi \nu^3 d\nu} \frac{E^2}{V}$ .

Si au contraire on adopte une vision corpusculaire de la lumière, en considérant que chaque quanta de lumière a une chance proportionnelle à  $e^{-\frac{h\nu}{kT}}$  de posséder une énergie égale à  $h\nu$ , alors l'énergie est cette fois, comme de Broglie l'a montré dans l'article précédent, fournie par la distribution de Wien :

$$E = \frac{8\pi h}{c^3} \nu^3 e^{-\frac{h\nu}{kT}} V d\nu$$

Impliquant une fluctuation de l'énergie :  $\overline{\varepsilon^2} = h\nu E$ .

---

<sup>108</sup> De Broglie (1922-B) et de Broglie (1922-C).



Or, la distribution réelle de l'énergie du rayonnement est celle de Planck :

$$E = \frac{8\pi h}{c^3} \nu^3 \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} V d\nu$$

Qui fournit à son tour une fluctuation d'énergie égale à :

$$\overline{\varepsilon^2} = h\nu E + \frac{c^3}{8\pi\nu^3 d\nu} \frac{E^2}{V}$$

Dans un travail de 1909, Einstein<sup>109</sup> avait déjà obtenu ce dernier résultat et interprété les deux termes de la somme comme représentant respectivement les deux aspects de la lumière : corpusculaire pour le premier, et ondulatoire pour le second.

Le papier de Louis de Broglie a pour objectif d'aller encore plus loin dans l'interprétation de cette formule en termes de structure de la lumière. Soulignant le fait que la loi de Planck peut se mettre sous la forme<sup>110</sup> :

$$\begin{aligned} E &= \frac{8\pi h}{c^3} \nu^3 e^{-\frac{h\nu}{kT}} V d\nu + \frac{8\pi h}{c^3} \nu^3 e^{-\frac{2h\nu}{kT}} + \dots \\ &= \sum_1^{\infty} \frac{8\pi h}{c^3} \nu^3 e^{-\frac{nh\nu}{kT}} V d\nu = E_1 + E_2 + \dots \end{aligned}$$

Louis de Broglie interprète cette formule de la manière suivante : « Le premier terme  $E_1$  correspond à l'énergie divisée en quanta  $h\nu$ , le second  $E_2$  à l'énergie divisée en quanta  $2h\nu$  (molécules de lumière à 2<sup>at</sup>), et ainsi de suite »<sup>111</sup>. Autrement dit, chaque terme  $e^{-\frac{nh\nu}{kT}}$  représente le nombre relatif de molécules de  $n$  quanta. La fluctuation peut alors se mettre sous la forme  $\overline{\varepsilon^2} = \sum_1^{\infty} n h\nu E_n$ , qui correspond, indique l'auteur, à une fluctuation d'énergie « d'un gaz de lumière » composé de « molécules » formées de 1, 2, etc. atomes de lumière. Louis de Broglie conclut :

«Au point de vue des quanta de lumière, les phénomènes d'interférences paraissent liés à l'existence d'agglomérations d'atomes de lumière dont les mouvements ne sont pas indépendants, sont cohérents. Dès lors, il est naturel de supposer que si la théorie des quanta de lumière parvient un jour à interpréter les interférences, elle devra faire intervenir de telles agglomérations de quanta »<sup>112</sup>.

Bien qu'ils n'apportent pas de résultats fondamentalement nouveaux et qu'ils se situent essentiellement du côté de la reformulation et de l'interprétation de résultats acquis, ces papiers possèdent un double intérêt dans la trajectoire de Louis de Broglie. D'une part, ce travail marque le basculement du centre de préoccupation de Louis de Broglie vers le problème de la synthèse entre un point de vue corpusculaire et un point de vue ondulatoire de la lumière. D'autre part, même si cela est

<sup>109</sup> Einstein (1909).

<sup>110</sup> Selon la formule du développement limité  $\frac{1}{1-x} = \sum_{n=0}^{\infty} x^n$  pour  $|x| \ll 1$ .

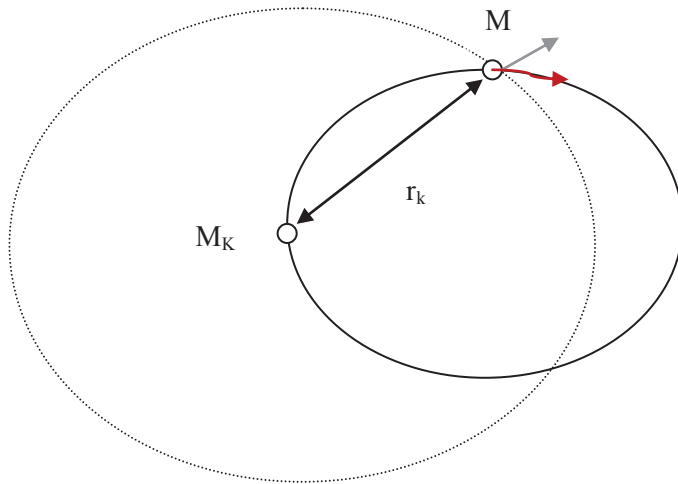
<sup>111</sup> De Broglie (1922-C), p. 66.

<sup>112</sup> *Ibid.*

encore exprimé de manière naïve, l'idée d'agglomération des quanta de lumière apparaît<sup>113</sup>. Louis de Broglie va enfin très loin, sans doute plus qu'Einstein lui-même, dans la conception du quantum lumineux perçu comme corpuscule à part entière (et non pas seulement comme un simple paquet d'énergie). Ce fait est de première importance car il favorisera dans l'esprit de Louis de Broglie, une vue synthétique de la dynamique des corpuscules, et ainsi une généralisation de la dualité onde-corpuscule à d'autres particules.

### La naissance de l'onde de phase ou l'unité de la matière et du rayonnement

La percée effectuée par Louis de Broglie vers cette synthèse paraît en 1923 dans une note intitulée *Ondes et quanta*<sup>114</sup>. Louis de Broglie y fait immédiatement référence à un travail écrit par Marcel Brillouin en 1919<sup>115</sup>. Dans ce travail, Brillouin tente une justification astucieuse des règles de quantification de Bohr. Il suppose qu'en plus de la lumière, les électrons sont des centres émetteurs d'ondes d'une autre nature se propageant au sein de l'atome à une vitesse ( $w$ ) moindre que celle des électrons eux-mêmes ( $u$ ). Sous cette condition, un électron parcourant une trajectoire périodique ou semi-périodique sera rattrapé par les ondes émises lors d'une ou plusieurs de ses positions antérieures.



Si la particule se trouvait au point  $M_k$  au moment  $t - \tau_k$ , alors, la condition pour que l'onde émise rattrape la particule au point  $M$  à l'instant  $t$  est :

$$r_k = w \int_{M_k}^M \frac{ds}{u} = w \tau_k$$

Où  $r_k$  est la distance entre les deux points et  $ds$  un élément de l'orbite de l'électron. Brillouin remarque qu'à chaque instant, le nombre de points  $M_k$  respectant cette condition est nécessairement fini, et reste stable au cours du temps. C'est donc ce nombre de points qui est à l'origine de la quantification des orbites. Brillouin suppose alors que sous l'influence du champ d'une de ses positions extérieures, la particule possède une énergie égale à :

<sup>113</sup> Selon la statistique de Bose-Einstein qui paraît deux ans plus tard, les quanta de lumière ne s'agglomèrent pas en molécule, mais dans les différents états quantiques.

<sup>114</sup> De Broglie (1923-A).

<sup>115</sup> Marcel Brillouin (1919).

$$\phi = \pm \frac{B^2}{r_k}$$

Où  $B$  est une constante. À l'aide de la première équation, Brillouin obtient l'égalité suivante :

$$\phi \int_{M_k}^M \frac{ds}{u} = \frac{B^2}{w}$$

Or, le membre de gauche de l'égalité est une action que Brillouin interprète comme étant la constante de Planck, arguant du fait que, si le point matériel est sous l'influence des champs correspondant à  $n$  positions antérieures, la valeur de l'action sera égale à  $n \frac{B^2}{w}$ .

On peut s'interroger sur la réelle influence du travail de Brillouin sur Louis de Broglie étant données les grandes différences entre les deux théories. Il n'en reste pas moins probable qu'au moment où Louis de Broglie réfléchissait intensément à la coexistence d'aspects ondulatoires et corpusculaires dans la structure de la lumière, l'introduction par Brillouin d'un aspect ondulatoire dans l'explication de la quantification des trajectoires électroniques ait favorisé l'idée d'envisager la possibilité que la dualité puisse s'étendre aux électrons.

Si de Broglie reprend l'idée d'une onde associée à un corpuscule, c'est la théorie de la relativité qui va permettre de fixer les caractéristiques de la propagation de cette onde. Pour de Broglie, le rapprochement de la théorie de la relativité d'une part (qui relie les notions d'énergie et de masse par la relation  $E=m_0c^2$ ) et de la théorie des quanta d'autre part (qui relie les notions d'énergie et de fréquence par la relation  $E=h\nu_0$ ) conduit à attribuer à toute particule de masse au repos  $m_0$  un phénomène périodique de fréquence  $\nu_0$  tel que :

$$m_0 c^2 = h\nu_0$$

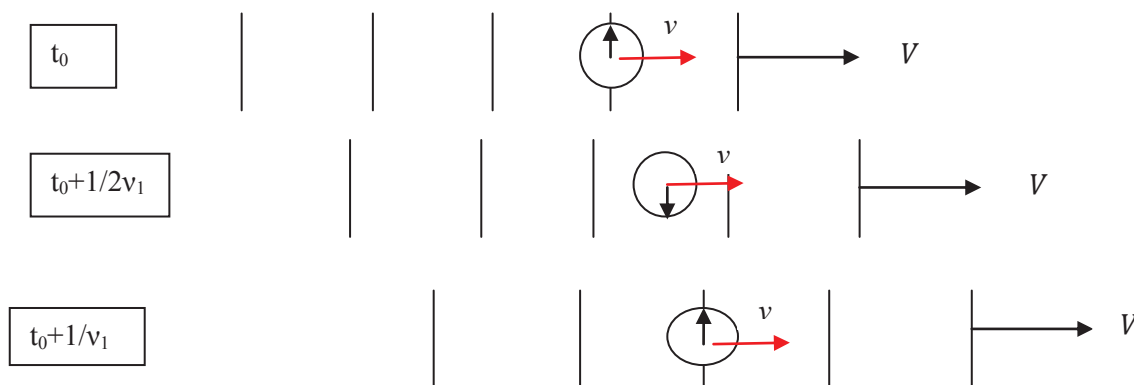
Un observateur se déplaçant à une vitesse  $v$  du mobile attribuera quant à lui, à l'énergie totale du mobile une fréquence :

$$\nu = \frac{m_0 c^2}{h\sqrt{1-\beta^2}}$$

avec  $\beta=v/c$ . Par ailleurs, la relativité permet formellement de définir une autre fréquence qui correspond au phénomène périodique dont le corpuscule est le siège, et qui s'exprimera, en raison de la dilatation relativiste du temps, de la façon suivante :

$$\nu_1 = \sqrt{1-\beta^2} \frac{m_0 c^2}{h}$$

Louis de Broglie confessa plus tard que la présence de ces deux fréquences a tout d'abord constitué un mystère. Il le résout en proposant l'existence d'une onde « fictive »<sup>116</sup> se propageant à une vitesse  $V = \frac{c}{\beta}$  dans la direction du mouvement du corpuscule et possédant une fréquence  $\nu$ . Il démontre effectivement que si cette onde est en phase à l'instant  $t_0$  avec le phénomène périodique interne, alors elle le restera tout au cours du mouvement.



**Illustration de l'accord des phases :** le schéma représente trois instants correspondant à deux maxima et un minimum du phénomène interne au corpuscule (la petite flèche symbolisant la phase du phénomène pointée vers « midi »). Le premier et le dernier instant sont donc séparés de la période du phénomène, soit d'un temps égal à  $1/\nu_1$ . Si donc la particule se situe à l'instant  $t_0$  au niveau d'une « crête » de l'onde fictive (symbolisée par un trait), elle se situera au niveau de la crête suivante à l'instant  $t_0 + 1/\nu_1$  de sorte que la phase du phénomène interne et celle de l'onde correspondent à chaque instant.

Il est alors en mesure de parachever son investigation sur la structure de la lumière :

« L'atome de lumière équivaut en raison de son énergie totale à une radiation de fréquence  $\nu$  est le siège d'un phénomène périodique interne qui, vu par l'observateur fixe, a en chaque point de l'espace même phase qu'une onde de fréquence  $\nu$  se propageant dans la même direction avec une vitesse sensiblement égale (quoique légèrement supérieure) à la constante dite vitesse de la lumière<sup>117</sup> ».

Mais le résultat le plus impressionnant est l'application de ce raisonnement à un électron parcourant une orbite de Bohr. Louis de Broglie remarque que la condition de stabilité d'une telle trajectoire revient à supposer que l'onde est en résonance avec elle-même le long de cette trajectoire fermée. Or, la condition de résonance, lorsqu'elle est exprimée en fonction des variables dynamiques de la particule, fournit directement les conditions de stabilité de Bohr-Sommerfeld :

$$\oint \vec{p} \cdot d\vec{r} = nh$$

<sup>116</sup> Le caractère fictif de l'onde vient de sa vitesse de propagation, supérieure à celle de la lumière. Effectivement, cette vitesse implique, pour rester en cohérence avec la théorie de la relativité, l'impossibilité pour cette onde de transporter de l'énergie.

<sup>117</sup> De Broglie (1923-A), p. 508.

Ce résultat acquis encourage de Broglie à ébaucher la nouvelle dynamique du point matériel qui découle de ses idées : un point matériel serait accompagné d'une onde de phase, et la trajectoire du point correspondrait à un rayon de l'onde, c'est-à-dire à la normale aux surfaces d'égale phase. Un énoncé programmatique d'une telle dynamique peut alors être posé en ces termes :

« Nous concevons donc l'onde de phase comme guidant les déplacements de l'énergie, et c'est ce qui peut permettre la synthèse des ondulations et des quanta. La théorie des ondes allait trop loin en niant la structure discontinue de l'énergie radiante et pas assez loin en renonçant à intervenir dans la dynamique. La nouvelle dynamique du point matériel libre est à l'ancienne dynamique (y compris celle d'Einstein) ce que l'optique ondulatoire est à l'optique géométrique<sup>118</sup> ».

Une telle synthèse du point de vue corpusculaire et du point de vue ondulatoire sera facilitée par la formulation en termes de principes extrêmes de la mécanique d'une part et de l'optique d'autre part<sup>119</sup>. Le principe de Fermat permet de déterminer les rayons d'une onde de fréquence  $\nu = \frac{m_0 c^2}{h\sqrt{1-\beta^2}}$  dans un milieu quelconque :

$$\delta \int \frac{v ds}{V} = \delta \int \frac{m_0 \beta c}{h\sqrt{1-\beta^2}} ds = 0$$

Le principe de moindre action d'une particule de quantité de mouvement  $p = \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1-\beta^2}}$  dans un champ de force conservatif permet également de fixer les trajectoires possibles de la particule :

$$\delta \int \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} ds = 0$$

Finalement, Louis de Broglie trouve le résultat remarquable que le principe de Fermat et le principe de moindre action ne font plus qu'un dans le cadre de la nouvelle dynamique du point matériel, justifiant ainsi l'identification des rayons de l'onde et des trajectoires du corpuscule.

Malgré tout soucieux de la confirmation expérimentale d'une si ambitieuse synthèse, Louis de Broglie indique « qu'un flot d'électrons traversant une ouverture assez petite présenterait des phénomènes de diffraction ». D'autre part, il propose une explication assez originale et curieuse des mécanismes d'absorption, d'émission induite et d'interférences lumineuses. Celui de l'absorption suppose que le « vecteur de l'onde de phase » de « l'atome de lumière » soit relié à la probabilité d'absorption de celui-ci par un atome situé à proximité. On comprend par là même le mécanisme des franges d'interférences : lors d'une expérience des fentes d'Young, les interférences des ondes de phase provenant des deux fentes fixeront les probabilités des effets photo-électriques résultant de l'absorption d'un quantum de lumière par un atome de l'écran. Enfin, lorsqu'un quantum de lumière est émis, son onde de phase est également reliée à la probabilité pour qu'un autre quantum de lumière de même fréquence que le quantum incident soit émis par un atome se situant à proximité. Les deux « atomes » de lumière partagent alors la même onde de phase. De Broglie indique qu'ils sont

---

<sup>118</sup> De Broglie (1923-B), p. 549.

<sup>119</sup> De Broglie (1923-C).

« couplés en onde ». Il s'agit d'une autre manière de traduire le phénomène d'agrégation des quanta que Louis de Broglie a décelé lors de son étude des statistiques du rayonnement.

De Broglie possède en conséquence de nouveaux outils conceptuels pour analyser ces statistiques. Une telle étude est entreprise au cours de la dernière des trois notes aux *Comptes rendus* qui posent les bases de sa théorie. La puissance de celle-ci à poser sur de nouvelles bases conceptuelles des lois par ailleurs déjà connues se relève ici aussi impressionnante que dans le domaine de l'atome de Bohr-Sommerfeld. La division de l'espace des phases en cellules de volume  $h^3$ , qui avait été proposée par Planck afin de permettre un calcul de l'entropie, se révèle interprétée d'une manière très élégante. L'espace des phases permet de représenter l'état d'un système physique (disons, un point matériel) par un point dans un espace dont chaque dimension représente une grandeur dynamique du système (par exemple  $(x, y, z, p_x, p_y, p_z)$  pour un point matériel). Un volume élémentaire de cet espace peut s'écrire (pour une particule non-relativiste) :

$$dxdydzdp_x dp_y dp_z = 4\pi m_0^{3/2} \sqrt{2w} dw dxdydz$$

Avec  $w$ , l'énergie cinétique de la particule et  $m_0$  sa masse au repos. Le calcul effectif de l'entropie nécessite de compter le nombre d'états possibles situés dans ce volume élémentaire. Pour ce faire, l'idée de Planck est donc de diviser ce volume en cellule de  $h^3$ . Le nombre d'état d'une particule possédant une énergie cinétique comprise entre  $w$  et  $w + dw$  dans l'élément de volume  $dxdydz$  est alors :

$$n(w)dw dxdydz = \frac{4\pi m_0^{3/2}}{h^3} \sqrt{2w} dw dxdydz$$

Si pour une température  $T$ , chaque particule possède une probabilité de se situer dans un état d'énergie comprise entre  $w$  et  $w + dw$  qui est proportionnelle à  $e^{-\frac{w}{kT}}$ , alors le nombre de particules situées dans ce volume de l'espace des phases est proportionnel à :

$$\frac{4\pi m_0^{3/2}}{h^3} \sqrt{2w} e^{-\frac{w}{kT}} dw dxdydz$$

Qui est la distribution de Maxwell-Boltzmann des vitesses.

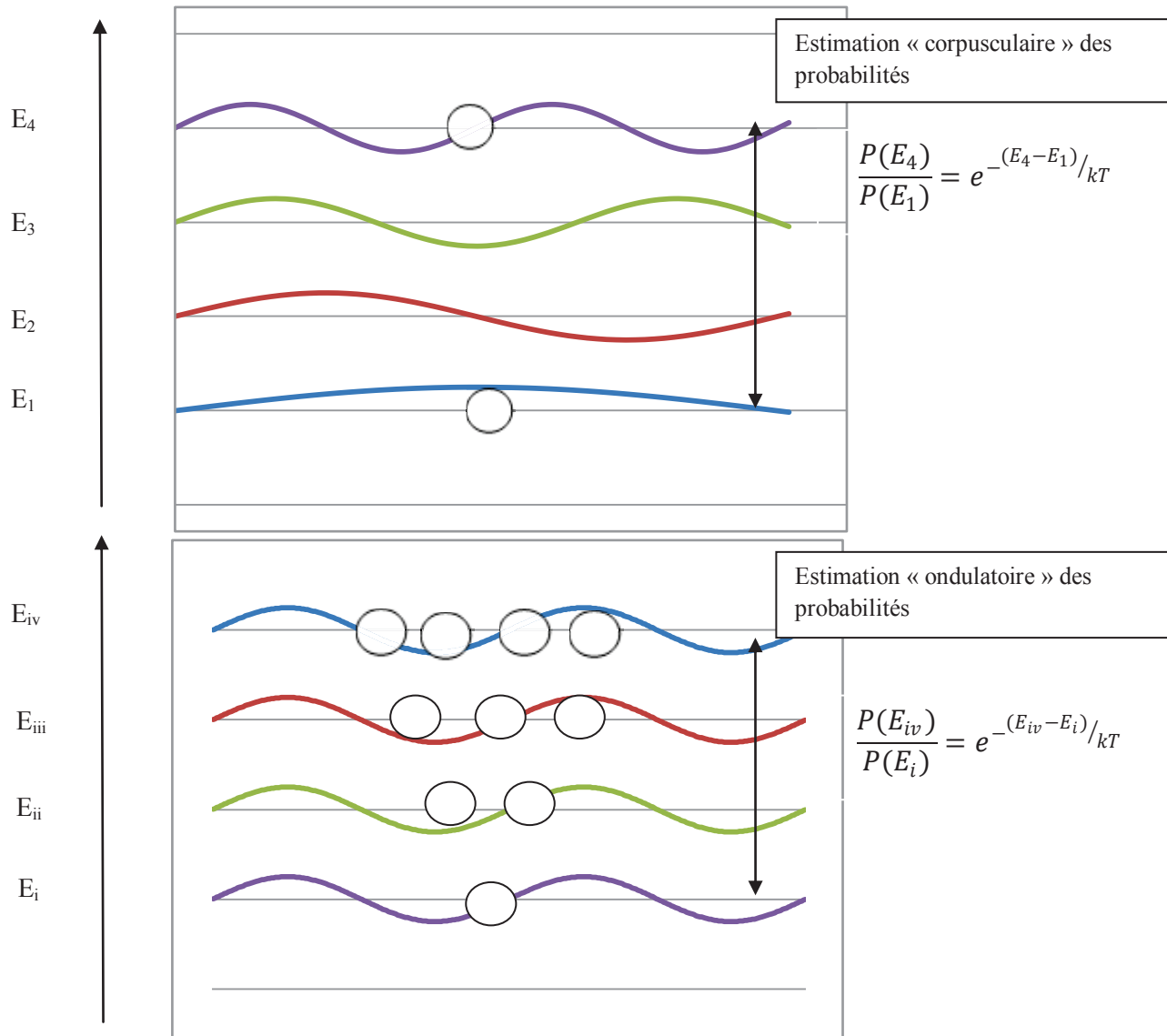
Or, Louis de Broglie fait remarquer qu'en prenant au sérieux l'idée selon laquelle une particule d'énergie  $w$  est reliée à une onde de fréquence  $\nu$ , il suffit alors de compter le nombre de modes d'ondes stationnaires dont les fréquences sont comprises entre  $\nu$  et  $\nu + d\nu$  pour déterminer le nombre d'états stationnaires. De la même manière que son hypothèse fixe le nombre d'états stationnaires pour les électrons d'un atome, elle fixe ce nombre pour les particules d'un gaz.

En revanche, Louis de Broglie change radicalement la méthode d'évaluation des probabilités. Après avoir échoué à retrouver la statistique de Planck pour la lumière par un raisonnement classique, il écrit dans sa thèse : « comme nous ne pouvons plus prendre chaque atome comme « objet » de la théorie générale, ce sont les ondes de phase stationnaires élémentaires qui doivent jouer ce rôle<sup>120</sup> ». Autrement dit, pour trouver la statistique de Planck, les probabilités ne sont plus évaluées sur les états

---

<sup>120</sup> De Broglie (1924), p. 116.

des corpuscules mais sur les états des ondes (pour une onde donnée, chaque état correspondant à la possession d'un certain nombre de corpuscules)<sup>121</sup>.



Si pour une onde de fréquence  $\nu$ , la probabilité moyenne de porter  $n$  corpuscule est proportionnelle à  $e^{-\frac{h\nu}{kT}}$ , alors, Louis de Broglie démontre que l'on obtient de nouveau, lorsqu'on prend la limite non-relativiste, la statistique de Maxwell-Boltzmann. Dans le cas d'un gaz de lumière, ce même mode de comptage permet de retrouver la loi de Planck. Louis de Broglie est donc très proche de découvrir la statistique quantique de Bose-Einstein avec un an d'avance, mais loupe le coche pour avoir été trop loin dans son analogie lumière-matière. À la différence du corps noir pour lequel le nombre de quanta par onde ne dépend que de la température, le nombre de particules par onde pour un gaz matériel devrait dépendre non seulement de la température mais également du nombre total de

<sup>121</sup> Le calcul de statistique classique consiste à déterminer la probabilité pour qu'une particule donnée se situe dans un état d'énergie donnée. Ici, le calcul de probabilité porte sur les ondes. Il consiste à déterminer la probabilité pour qu'une onde donnée contienne  $n$  particules. Voir schéma ci-dessus.



particules contenues dans le gaz qui ne peut *a priori* pas varier, ce que son raisonnement ne prend nullement en compte<sup>122</sup>.

Comme nous le verrons plus tard, ce n'est pas la dernière fois que l'analogie entre matière et lumière se révèle décisive dans les options scientifiques de Louis de Broglie. Il n'est pas exagéré d'en faire le fil directeur de toute l'évolution de sa pensée scientifique.

## II- L'ascension

### 1- Diffusion et reconnaissance de ses travaux

Considéré comme un « outsider » dans le milieu des théoriciens quantistes et guère plus renommé en France, Louis de Broglie développe ses idées sur la dualité onde-corpuscule durant les années 1922-1923 de manière relativement isolée. Outre son frère et les membres de son laboratoire, de Broglie bénéficie cependant d'interlocuteurs assez privilégiés. Ainsi, Léon Brillouin raconte :

« Louis De Broglie was coming regularly to the Ecole de Physique et Chimie to meet Langevin and myself. I think we were the only three [i.e. Langevin, Brillouin et Maurice de Broglie] people to whom he talked during the time he wrote his thesis. »<sup>123</sup>

La thèse est soutenue à la fin de l'année 1924 à la Sorbonne devant un jury composé de Paul Langevin, Jean Perrin, Elie Cartan et Charles Mauguin. Brillouin décrit assez justement, semble-t-il, la réaction que suscitent ses idées :

« There was a good deal of interest from many people. Of course most people were terribly skeptical. Generally people were skeptical, and not only in France. I don't think very many people took it seriously before Schrodinger... Einstein took it seriously. Langevin and I took it seriously. My father was interested, but it was not exactly what he had been thinking of so he didn't like it too much. People were interested but nobody was convinced that it could be the link to a final solution. Everybody felt that there was too much uncertainty in his theory to believe it. »<sup>124</sup>

Ce sentiment que l'on a affaire à un travail important, associé à une très grande prudence quant à sa réelle portée, se retrouve assez bien dans sa réception par les membres du jury de thèse. Charles Mauguin avoue qu'il n'avait pas cru alors à l'existence des ondes de matière<sup>125</sup>. Dans son rapport de thèse, Langevin semble quant à lui apprécier « *l'originalité et la profondeur des idées [et] la coordination remarquable qu'elles permettent* »<sup>126</sup> mais ne semble cependant pas adhérer totalement aux idées de broglienne, en raison notamment de sa prudence sur l'hypothèse même de l'existence des

---

<sup>122</sup> En réalité, son mode de raisonnement serait valable à très haute température ( $kT \gg mc^2$ ), dans le cas où les processus de créations et d'annihilations de particules – qui n'étaient pas connues encore à l'époque – feraient varier le nombre totale de particules. Bien entendu, cela exclurait toute tentative de prendre la limite non relativiste de la statistique.

<sup>123</sup> Brillouin (1962).

<sup>124</sup> *Ibid.*

<sup>125</sup> Mauguin (1953), p. 434.

<sup>126</sup> Archives de l'Académie des sciences (42J /boîte 1), Rapport Paul Langevin.

quanta de lumière<sup>127</sup>. Le rôle de Langevin dans la diffusion des idées de Louis de Broglie est malgré tout décisif. Langevin communique la thèse à Einstein, ce qui débouche sur une correspondance entre les deux physiciens. À Einstein qui réagit avec une formule restée célèbre (« Le travail de Louis de Broglie a fait une grande impression sur moi ; il a levé un coin du grand voile<sup>128</sup> »), Langevin répond « il subsiste bien des difficultés, [...] mais j'ai l'impression qu'il faut voir jusqu'où on peut aller dans ce sens »<sup>129</sup>.

L'enthousiasme d'Einstein s'explique principalement par ses travaux récents sur les développements de la statistique de Bose. Cette statistique est *a priori* purement corpusculaire, mais possède ceci de commun avec la statistique de Louis de Broglie qu'elle consiste à estimer non pas la probabilité pour une particule donnée d'être dans tel niveau d'énergie, mais à estimer la probabilité pour qu'un niveau d'énergie donné soit occupé par tel nombre de particules. En calculant les fluctuations statistiques d'un tel gaz de particules, Einstein trouve le résultat remarquable que cette fluctuation est, à l'instar de la statistique du corps noir, la somme de deux termes, un corpusculaire et un ondulatoire. On imagine facilement qu'il ait pu voir dans la thèse de Louis de Broglie une élégante interprétation de ce résultat étonnant.

Dans le laboratoire de son frère, la thèse ne rencontre pas l'unanimité. Conscient des potentialités de vérification expérimentale de l'existence des ondes électroniques, Louis de Broglie négocie très tôt avec Dauvillier cette éventualité. Malheureusement, ce dernier refuse de réorienter ses propres travaux dans cette direction<sup>130</sup>. Nous voici ici peut-être devant les conséquences de certains aspects de la physique française de cette période. Mais il ne faut cependant pas porter de jugements si hâtifs. Le laboratoire de Maurice de Broglie est à cette époque tout à fait ouvert aux hypothèses quantiques. Il s'agit même d'un des lieux de la physique de l'époque où le concept de quantum de lumière est adopté le plus sérieusement<sup>131</sup>, même si on y observe encore une certaine réserve envers les spéculations théoriques trop sophistiquées. D'autre part, comme nous allons le voir, ce n'est pas qu'en France que la thèse de Louis de Broglie a rencontré un certain scepticisme.

C'est cependant bien à l'étranger que les travaux de Louis de Broglie vont recevoir toute leur reconnaissance. Nous avons vu précédemment que les théoriciens les plus susceptibles d'être intéressés par ces travaux avaient des raisons d'être assez mal disposés vis-à-vis de Louis de Broglie. Sa thèse suscite cependant quelques discussions en Angleterre autour de Dirac. Voulant ainsi présenter un exposé sur le sujet des relations « between particles and wave fields », ce dernier écrit directement à de Broglie pour lui demander une copie de sa thèse en juillet 1925<sup>132</sup>. Dirac indique cependant à Kuhn en 1962 qu'il ne prit alors pas réellement l'idée au sérieux<sup>133</sup> et concentra très vite son attention sur les idées développées alors par Heisenberg. La thèse suscite également un intérêt à Göttingen autour de Max Born qui joue alors un rôle central dans l'histoire de la confirmation expérimentale de

<sup>127</sup> C'est ce que montre Chieko Kojima dans son étude des cours de Paul Langevin durant les années 1920 (Kojima (2001)).

<sup>128</sup> Einstein (1924), p. 172.

<sup>129</sup> Langevin (1924), p. 174.

<sup>130</sup> Lochak (1992), p. 107.

<sup>131</sup> Voir Wheaton (1983).

<sup>132</sup> Archives de l'Académie des sciences (42J / « correspondance scientifique »). Dirac (1925).

<sup>133</sup> Dirac (1962). Il dit notamment : « I did know about it and I wasn't strongly impressed by it because it seemed to me to be a mathematical curiosity. I didn't take these waves as something physically real in the way that Schrodinger did. It never occurred to me to try to generalize it for particles which are not moving uniformly. I looked upon it just as a mathematical curiosity. » Et plus loin : « I think it was just speculative what he said about the possibility of connecting these waves with quantum condition. It was just a speculation. I don't think people took it seriously. Nobody except Schrödinger took it seriously. »

l'existence « des ondes de matières<sup>134</sup> ». Si la chronologie historique n'est pas claire<sup>135</sup>, deux faits sont à l'origine de cet intérêt local : les travaux d'Einstein sur la statistique de Bose que nous venons de mentionner et la réception par Max Born des résultats étonnants de Davisson et Kunsman<sup>136</sup>. Un des étudiants de Born, Walter Elsasser, se lance alors dans cette voie. Born indique lui-même à Einstein dès Juillet 1925 croire « maintenant que la « théorie ondulatoire de la matière » peut devenir une affaire très importante »<sup>137</sup>. Un physicien américain en séjour à Göttingen, Dymond, se lance également dans le programme de recherche d'une confirmation expérimentale. Enfin, Born communique l'existence de la théorie à Davisson d'une part et à Thomson d'autre part, qui fourniront les premières vérifications expérimentales solides de celle-ci en 1927.

Entre-temps, l'ensemble de la communauté des physiciens atomistes commence enfin à prendre la thèse au sérieux depuis la publication des travaux de Schrödinger au début de l'année 1926. C'est encore par l'intermédiaire d'Einstein, et de leur intérêt commun pour les statistiques des gaz, que Schrödinger en vient à étudier la thèse. Mais contrairement à beaucoup d'autres, Schrödinger comprend que l'intérêt de la thèse ne se résume pas à son application à la physique statistique, mais également à la modélisation de l'atome. Le résultat de son travail est bien connu et, même si Schrödinger reconnaît sa dette envers les idées inspiratrices de Louis de Broglie, sa propre théorie ondulatoire de la matière en est, selon ses propres termes, « une application un peu plus intime<sup>138</sup> » : la théorie de Schrödinger n'est pas relativiste, elle est purement ondulatoire et elle ne décrit pas les phénomènes dans l'espace réel à 3 dimensions mais dans l'espace de configuration à  $3N$  dimensions ( $N$  étant le nombre de particules).

## 2- Consécration institutionnelles

Les années 1926-1927 marquent donc la période durant laquelle le statut de Louis de Broglie change radicalement. Même si, contrairement à ce que certains récits mythiques prétendent, le nom de ce physicien français n'était plus totalement inconnu de la communauté des théoriciens atomistes depuis déjà quelques années, il n'était associé à aucun des principaux programmes de recherche de l'époque, ni à aucun réseau. Son mode d'approche, qui laisse une grande place à la visualisation des phénomènes dans l'espace et le temps, pouvait également être perçu comme archaïque chez des physiciens qui cherchaient souvent la solution aux problèmes des quanta vers des directions toujours plus formelles et abstraites. De fait, la confirmation théorique (Einstein puis Schrödinger) et expérimentale (Davisson et Germer, Thomson) de ses travaux lui offrent une visibilité beaucoup plus grande. La consécration institutionnelle débute dès 1926 avec l'obtention de prix décernés par l'Académie des sciences en 1926 (Prix Jules Mahyer), en 1927 (Prix Becquerel) et en 1929 (Médaille Henri Poincaré)<sup>139</sup>. Mais le premier grand événement est son invitation à participer au 5<sup>ème</sup> Conseil Solvay en 1927. En 1921, Louis de Broglie s'était vu refuser la participation, en tant qu'observateur,

<sup>134</sup> Voir par exemple Russo (1994).

<sup>135</sup> Les témoignages de Max Born et d'Elsasser diffèrent quelque peu. Max Born indique qu'Einstein avait attiré son attention sur la thèse de Louis de Broglie et qu'il avait ainsi eu l'idée de confier le soin à Elsasser d'interpréter les résultats de Davisson par le phénomène de diffraction électronique (Born, Einstein (1972), p. 102. En revanche, Elsasser raconte que l'idée des ondes de matière a été étudiée à Göttingen grâce à sa lecture du travail d'Einstein en question dans laquelle une note faisait référence à la thèse de Louis de Broglie (Elsasser(1962)).

<sup>136</sup> Il s'agit des premières traces de diffraction électronique.

<sup>137</sup> Born (1925), p. 99.

<sup>138</sup> Archives de l'Académie des sciences (42J / « correspondance scientifique »), Schrödinger (1926).

<sup>139</sup> Archives de l'Académie des sciences (42J / Boîte 1), titres divers.

au Conseil qui portait alors sur les « Atomes et électrons »<sup>140</sup>. On peut donc imaginer sa satisfaction lorsque, au tournant des années 1926-1927, il reçut une lettre du président du Conseil Hendrik Lorentz lui indiquant qu'il avait « l'honneur, tant au nom de la commission administrative de l'Institut qu'à celui du Comité scientifique, de [l'] inviter à la réunion » portant sur le sujet « de la théorie des quanta et des théories classiques du rayonnement »<sup>141</sup>. Mieux encore, Louis de Broglie fait partie des rapporteurs et se voit confier par Lorentz l'examen « du conflit entre les vues modernes et celles d'autrefois et les tentatives qui ont été faites pour arriver à une nouvelle dynamique »<sup>142</sup>. Cette « commande » débouchera sur un rapport intitulé « la nouvelle dynamique des quanta » qui donnera l'occasion à Louis de Broglie de présenter devant les plus grands spécialistes du sujet ses vues sur une interprétation causale de la nouvelle mécanique ondulatoire : *la théorie de l'onde pilote*.

Bien qu'il accède dès cette période à une notoriété internationale, Louis de Broglie ne possède encore aucune position au sein de la recherche française. Son profil purement théorique est assez atypique au sein de la physique française, comme nous l'avons vu précédemment. Autre théoricien français invité au Conseil Solvay en 1927, et aîné de Louis de Broglie de quelques années, Léon Brillouin indique en 1962 à Ewald et Kuhn qu'il n'avait lui-même en 1928 aucune position régulière en France et qu'il s'apprêtait à prendre un poste aux Etats-Unis lorsque sa femme lui apprit la future création de l'Institut Henri Poincaré en France et sa très probable nomination à un poste de professeur<sup>143</sup>. Jean Ullmo raconte également dans son interview avec Thomas Kuhn toute la difficulté pour un physicien théoricien de l'époque de faire carrière :

« Being a physicist meant being in a laboratory, and if you were clever or keen enough, you did some calculations about this, as Langevin had done for magnetism. But the idea of someone absolutely concentrating in his office, in his cabinet, and doing theoretical physics was new at the time<sup>144</sup> ».

Ullmo raconte également comment pouvait s'estimer à l'époque la situation hiérarchique de Louis de Broglie au sein de la physique française :

« Before he received all those honors and became an independent professor, he lived in the shadow of Langevin. For those years when I worked with him, we worked together as two pupils of Langevin. There was not a question of his being the professor and my being the student; we were pupils of Langevin. [...] De Broglie came absolutely regularly to the seminar de Langevin, absolutely. He was exactly like a pupil. »

Louis de Broglie obtient après le conseil Solvay et pendant un an la tenue d'un cours libre à la Sorbonne. Il y développe ses idées sur l'interprétation de la mécanique ondulatoire par la théorie de la double solution et de l'onde pilote, à une période où il commence justement à douter de ces théories.

Parmi ses (rares) auditeurs figure Léon Rosenfeld qui raconte :

« [In fact] when I asked for the name “de Broglie” I had to repeat it several times and finally write it out before the people understood whom I wanted to see and could direct me to his office. [...] de Broglie was very queer. His course was very interesting because he just described his work, his whole idea, but at that time he was absolutely groping around. He ignored [i.e., did not know about]

<sup>140</sup> Voir Pange (1962), et Lochak (1992), p. 77.

<sup>141</sup> Archives de l'Académie des sciences (42J/ « correspondance). Lorentz (1926).

<sup>142</sup> *Ibid.*

<sup>143</sup> Brillouin (1962).

<sup>144</sup> Ullmo (1963).

Schrodinger — well, not quite, but he ignored at any rate the Copenhagen school — so he was groping around; he asked me to —. I remember, just as one example, that J.J. Thomson, who must have been quite senile at that time, had published a note in *Nature* about some model of the electron, rotating electron. De Broglie asked me to study it to see whether that was not a way of getting (around). At that time one was preoccupied with the spin problem, but de Broglie had no idea even of how the problem had to be formulated [...] I was the only one talking with de Broglie. He gave a course which was followed by a dozen people who went there, sat down, took notes, and then went away. I was the only one who approached him. He was so shy — and I was shy too — that the first contact was rather difficult, but then, as it happens with shy people after the first contact has been established, [we became] very intimate. For instance, when he had finished his lectures I followed him and we walked together down the street and discussed things<sup>145</sup>. »

La création de l'Institut Henri Poincaré (IHP) en 1928 permet enfin à Louis de Broglie d'obtenir un poste stable en tant que maître de conférences<sup>146</sup>. La création de cet institut marque une étape importante dans l'institutionnalisation de la physique théorique en France et valide une prise de conscience progressive réalisée par un petit groupe de mathématiciens et de physiciens, des lacunes françaises dans cette dernière discipline et de la fertilité qu'il y aurait à établir un rapprochement entre physique théorique et mathématiques autour de la statistique<sup>147</sup>. Ses statuts qui prévoient l'invitation systématique de chercheurs étrangers permettent en outre à la physique théorique française de s'ouvrir sur l'étranger.

L'*International Education Board* (IEB) de la famille Rockefeller assure en grande partie le financement de l'IHP, le reste étant pris en charge par la Famille Rothschild et l'état français. Le projet est amorcé en 1926, lors du séjour en France pendant six mois du mathématicien américain Georges David Birkhoff — envoyé par l'IEB — et de sa rencontre avec les *leaders* de la communauté mathématicienne de France. Émile Borel, futur directeur de l'IHP, prend la tête des négociations avec les Américains. Léon Brillouin<sup>148</sup> insiste également sur le rôle du physicien Edmond Bauer, alors familier de Birkhoff, dans l'enclenchement du processus. Quoi qu'il en soit, et même si l'initiative du projet revient aux mathématiciens, la physique théorique y est intégrée. Borel, dont les travaux portent notamment sur les statistiques, réfléchit depuis longtemps à la convergence entre cette branche des mathématiques et les nouvelles théories de la physique et entrevoit tout l'intérêt d'offrir aux physiciens théoriciens un espace en commun avec les mathématiciens. L'article 2 du règlement de l'Institut indique par ailleurs la place importante occupée par la physique théorique :

« Cet institut constitue un centre d'enseignement et de recherches scientifiques sur la physique mathématique et théorique et les sciences connexes, telles que le calcul des probabilités »<sup>149</sup>.

Resurgit ici la question de l'incidence d'un tel rapprochement pour les orientations de la physique théorique française que nous réaborderons plus tard.

---

<sup>145</sup> Rosenfeld (1963).

<sup>146</sup> La question qui peut être posée est celle qui consiste à savoir pourquoi Léon Brillouin a été préféré à Louis de Broglie pour le poste de Professeur. Sans prétendre y répondre, on peut tout de même indiquer que Léon Brillouin était plus âgé de quelques années, était issu du sérail (fils de Marcel Brillouin et ancien étudiant de l'ENS) et possédait déjà une solide réputation, que cela soit en France auprès des personnes qui composeront le comité directeur de l'IHP (Borel, Langevin, Perrin) ou même à l'étranger (il participe au 5<sup>ème</sup> Conseil Solvay en 1927).

<sup>147</sup> Voir Siegmund-Schultze (2009).

<sup>148</sup> Brillouin (1962).

<sup>149</sup> Création de l'Institut Henri Poincaré, Archives nationales, carton AJ 16 5775<sup>2</sup>.

Les Américains auraient, d'après les témoignages, été réservés sur la disponibilité de scientifiques français de haut rang pour occuper les postes à pourvoir. Émile Borel raconte ainsi que c'est uniquement lorsqu'il proposa le nom de Louis de Broglie que les Américains furent convaincus<sup>150</sup>. Comme nous l'avons vu, ce dernier se voit offrir en 1928 « seulement » un poste de maître de conférences au sein du nouvel Institut. Cependant, il apparaît vite que cette situation est provisoire. Dans une note au Ministère de l'éducation nationale du 1<sup>er</sup> Octobre 1931, le Doyen de la Faculté des Sciences Charles Maurain déclare :

« Tout jeune encore, M. Louis de Broglie est célèbre par ses travaux de physique théorique qui lui ont valu le prix Nobel. C'est d'ailleurs un excellent professeur. La faculté sera heureuse de le présenter pour un poste de professeur titulaire dès que les circonstances le permettront »<sup>151</sup>.

Ces circonstances se présentent très rapidement. Dès 1932, Léon Brillouin, titulaire de la chaire de théories physiques attachée à l'IHP remplace son père au Collège de France. Louis de Broglie est désigné à l'unanimité (26 votants sur 26) comme son successeur par le Conseil de la Faculté des Sciences<sup>152</sup>. Titulaire d'un des rares postes exclusivement consacrés à la physique théorique en France, Louis de Broglie se voit alors occuper une position de premier plan au sein de la communauté des physiciens français, position renforcée par le fait qu'entre-temps, Louis de Broglie a obtenu le prix Nobel de Physique<sup>153</sup>.

À partir des années 1930, Louis de Broglie jouit ainsi d'un prestige qui lui offre l'accès à de nombreuses positions. Élu notamment membre de l'Académie des Sciences en 1933, il en devient secrétaire perpétuel en 1942. Il accède en outre à un nombre très important de commissions et de conseils : citons notamment ses nominations en tant que membre titulaire du Bureau des Longitudes en 1943, en tant que membre du Comité consultatif des universités, du Conseil de l'Enseignement ou encore, en 1946, du Conseil Supérieur de l'Éducation nationale<sup>154</sup>.

Au total, que ce soit au niveau de l'enseignement<sup>155</sup>, de la nomination aux postes ou de l'orientation scientifique, Louis de Broglie se voit attribuer de nombreuses clefs afin peser sur les orientations de la physique théorique française.

### III- Portait scientifique et philosophique d'un physicien

Louis de Broglie est un physicien théoricien en grande partie autodidacte. L'absence de véritables théoriciens aptes à le former dans son entourage, à l'exception peut-être de Langevin, est

---

<sup>150</sup> Siegmund-Schultze (2009), p. 262.

<sup>151</sup> Dossier Louis de Broglie, Archives nationales, (F17/27953).

<sup>152</sup> *Ibid.*

<sup>153</sup> En 1929, pour « sa découverte de la nature ondulatoire des électrons ».

<sup>154</sup> Archives de l'Académie des sciences (42J / Boîte 1), titres divers. L'énumération faite ci-dessus est très loin d'être exhaustive. La liste complète comprend plus d'une cinquantaine de titres et de nominations diverses. Comme le souligne son élève Georges Lochak, « il fut membre de toutes les académies, lauréat de tous les prix, détenteur de toutes les médailles, décoré de tous les ordres, possesseur de tous les titres dont puisse rêver un homme de science » (Lochak (1992), p. 164.)

<sup>155</sup> Louis de Broglie enseigne également de 1934 à 1957 à l'ENS, et à partir de 1945 à l'Ecole Supérieure d'Electricité. Il est en outre consulté sur des questions d'orientation de l'enseignement à l'Ecole Polytechnique. Nous y reviendrons.



sans doute responsable de sa vision assez originale de la physique théorique. Bien entendu, sa conception de la discipline a été alimentée par ses lectures assidues et parfois critiques de ses glorieux aînés (citons notamment Poincaré, Duhem, Einstein) mais il n'en demeure pas moins que le regard que peut porter le théoricien moderne sur le style de recherche de Louis de Broglie est parfois chargé de réserves. Ainsi, le théoricien français Maurice Lévy, dont la chaire de physique théorique a cohabité à la fin des années 1950 avec celle de « théories physiques » de Louis de Broglie à la Sorbonne, indique :

« Louis de Broglie - Einstein aussi dans une certaine mesure – considérait que les théories physiques devaient être librement inventées, ensuite comparées éventuellement à l'expérience. [...] Il a eu cette idée géniale qu'un électron pouvait être associé à une onde [...] et il s'est imaginé que la physique, c'était comme ça que ça se passait. Un jour, je me rappelle qu'un physicien américain qui s'appelait Félix Bloch [...] m'a dit : « ben voilà comment cela s'est passé. Il s'est assis un jour à sa table de travail, et il s'est dit : « ça serait drôlement bien si le monde était comme ça ». Et, le monde était comme ça ! » Et ça, ça a été une influence terrible pour lui parce qu'il a toujours pensé que la physique théorique, ça se passait comme ça »<sup>156</sup> ».

Or, toujours selon Maurice Lévy, c'est précisément cette caractéristique qui distingue le style de physique théorique pratiquée par Louis de Broglie et ses élèves et qui le différencie de la physique théorique moderne qui s'installe progressivement après la seconde guerre mondiale :

« Nous, on nous avait appris à partir de l'expérience. C'est-à-dire : il y avait tels et tels résultats expérimentaux qui collaient pas ou qui collaient mais on ne comprenait pas pourquoi, et nous, nous devons expliquer, si possible à partir de principes fondamentaux, pourquoi l'expérience donnait tel résultat. C'était notre approche. [...] Eux [Louis de Broglie et ses élèves] étaient des gens qui bâtissaient des théories qui étaient ou n'étaient pas [en accord avec l'expérience]...En général, ils s'arrangeaient pour qu'on ne puisse pas les comparer avec l'expérience, comme ça, ils étaient tranquilles ».

On peut suggérer à partir de ces considérations que Louis de Broglie a su imposer à ses élèves une vision de la physique théorique qui lui est propre. Étant donnée l'importance sociologique de ce groupe au sein de la physique théorique française, ceci n'aurait pas manqué de donner une coloration particulière à cette discipline en France. Nous réservons toutefois la discussion de l'influence effective de la vision de broglienne de la théorie sur ses élèves à plus tard pour se concentrer ici sur ses caractéristiques propres.

Pour ce faire, nous tenterons dans un premier temps de dégager sa conception de la physique théorique telle qu'il l'exprime explicitement dans de nombreux textes de réflexions épistémologiques, puis nous chercherons à compléter ou à confronter cette étude à la pratique effective de la théorie telle qu'elle paraît dans ses travaux publiés.

## 1- La philosophie scientifique de Louis de Broglie

La phase de la carrière de Louis de Broglie que marque son retour à une recherche d'interprétation réaliste de la mécanique ondulatoire (à partir de 1951) constitue pour lui un moment privilégié de prise de recul sur la pratique de son activité de théoricien. Il s'agit en effet de justifier sa

---

<sup>156</sup> Maurice Lévy (2011).



nouvelle orientation en lui donnant une cohérence dans le cadre d'une vision claire de la discipline. Il n'est donc pas surprenant que nous trouvions dans les années 1950 les textes les plus explicites sur celle-ci.

#### a) Les objectifs de la physique théorique

Louis de Broglie est un réaliste<sup>157</sup> qui ne cache pas sa recherche d'une « *Weltbild* » (une vision ou une conception du monde physique). Ainsi, il rejette catégoriquement les restrictions aux ambitions de la théorie physique établies par des penseurs de tendance instrumentaliste et phénoménologue. Commentant Pierre Duhem selon qui :

« Une théorie physique n'est pas une explication : c'est un système de propositions mathématiques qui ont pour but de représenter aussi simplement, aussi complètement et aussi exactement que possible un ensemble de lois expérimentales »

Louis de Broglie indique :

« [Cette conception] plaisait certainement aux physiciens de l'école énergétiste, ses contemporains : elle a certainement aussi la faveur d'un grand nombre de physiciens quantistes de l'heure actuelle. D'autres, la trouvaient déjà ou la trouveront encore un peu étroite et lui reprocheront de diminuer d'une façon exagérée la connaissance que les progrès de la Physique peuvent nous procurer de la réalité profonde<sup>158</sup> ».

Car pour le savant français, il ne fait aucun doute que « le désir de comprendre et de se représenter clairement la réalité physique a toujours été et restera sans doute toujours le but le plus élevé et l'effort finalement le plus fructueux de la recherche scientifique fondamentale<sup>159</sup> ».

Ainsi, malgré tout l'intérêt que Louis de Broglie a porté aux applications technologiques des sciences fondamentales<sup>160</sup>, il conçoit avant tout son métier de physicien théoricien comme devant consister à pénétrer toujours plus profondément dans le dévoilement de la réalité, dans la droite ligne de la tradition de la philosophie naturelle. Car, pour Louis de Broglie, il y a bien « deux aspects sous lesquels on peut envisager la science suivant qu'on se place au point de vue purement intellectuel ou, au contraire, au point de vue des applications pratiques » :

« [...] ces deux orientations de la science, l'une dirigée vers la recherche désintéressée du vrai et l'autre vers l'application pratique de nos connaissances [...] ont [...] une certaine tendance naturelle à s'opposer l'une à l'autre [...]. Les savants qui cultivent la science pure et ceux qui sont tournés vers les applications techniques ont des états d'esprit et des préoccupations qui diffèrent. Les cadres dans lesquels ils se meuvent ne sont pas les mêmes : le savant dans son laboratoire de recherches ou son

---

<sup>157</sup> Nous entendons par « réalisme » la position philosophique suivante : une théorie physique a vocation à donner une description des processus physiques tels qu'ils se déroulent par eux même, indépendamment de l'observateur.

<sup>158</sup> De Broglie (1956-B), pp. 322-323.

<sup>159</sup> Louis de Broglie (1966-B), p. 65.

<sup>160</sup> La biographie de Lochak (1992) fait très clairement apparaître cet état de fait. On peut également s'en convaincre en regardant dans ses archives déposées à l'Académie des sciences, ou encore par son livre sur les guides d'onde (de Broglie, 1951-B).

cabinet de travail ne respire pas la même atmosphère que le technicien dans son laboratoire industriel ou son bureau d'études »<sup>161</sup>

Au total, l'homme adhère à une vision largement partagée dans la France de son époque<sup>162</sup> du savant avant tout préoccupé par la recherche de la connaissance pure et désintéressée. Par ailleurs clairement hostile aux restrictions positivistes (pourtant elles aussi largement partagées en France à cette période) quant à la portée de telles connaissances, la visée de ces dernières ne peut être que la réalité elle-même. Cette vision de la science en général ne peut que plaider pour donner comme objectifs à la physique théorique des ambitions qui dépassent la simple coordination des lois expérimentales afin d'atteindre ce qui ressemble à une compréhension du réel.

#### b) Le réalisme de Louis de Broglie

Louis de Broglie est avant tout un physicien et non pas un épistémologue. Or, la question du réalisme ne se pose pas d'emblée au physicien confronté à ses préoccupations journalières. Il faut généralement une crise pour qu'une telle question s'impose avec urgence à son esprit. C'est la crise scientifique amenée par les débats sur l'interprétation de la mécanique quantique qui va jouer chez Louis de Broglie ce rôle de révélateur. Or, les premiers temps du débat sont marqués par ses tentatives d'une interprétation de la mécanique quantique – la théorie de la double solution et la théorie de l'onde pilote – qui conservent toutes les caractéristiques de la physique classique : le déterminisme des phénomènes, et la possibilité d'en donner une description dans le cadre de l'espace et du temps. Si dans un premier temps, le déterminisme va monopoliser l'attention, la possibilité d'une description d'une réalité sous-jacente et inaccessible expérimentalement apparaît déjà dans les échanges de Louis de Broglie avec les membres de l'école de Copenhague au Conseil Solvay de 1927, comme le montre l'extrait suivant :

Kramers : « Quel avantage voyez-vous à donner une valeur précise à la vitesse des photons ? »

-de Broglie : « Cela permet de se représenter la trajectoire suivie par les photons et de préciser le sens de ces entités ; on peut ainsi considérer le photon comme un point matériel ayant une position et une vitesse ».

-Kramers : « Je ne vois pas bien, pour ma part, l'avantage qu'il y a, pour la description des expériences, à se faire une image où les photons parcourent des trajectoires bien définies »<sup>163</sup>.

Même pendant son ralliement officiel de près de 25 ans aux thèses de Bohr et Heisenberg<sup>164</sup>, la difficile conciliation entre une position réaliste et l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique avait été le principal point de tension à son adhésion<sup>165</sup>. Face à cette situation, Louis de

---

<sup>161</sup> De Broglie (1947-C), p. 336.

<sup>162</sup> Voir Pestre (1992).

<sup>163</sup> Conseil Solvay (1928), p. 266.

<sup>164</sup> Je rappelle ici qu'après avoir tenté de proposer sa propre interprétation de la mécanique quantique (1925-1927), Louis de Broglie se range officiellement à l'interprétation purement probabiliste en 1928 avant de revenir à ses premières idées à partir de 1951.

<sup>165</sup> J'ai étudié par ailleurs cette question dans mon mémoire de master (Vila Valls (2009)). Un article est également à paraître sur le sujet.

Broglie oscillait très clairement entre deux attitudes, dont on peut d'ailleurs trouver les traces dans son évocation rétrospective de ses conversations avec l'auteur d'*Identité et Réalité*, Emile Meyerson, à la fin des années 1920 :

« À certains moments, je sympathisais entièrement avec lui [Meyerson] car je me sentais attiré par les idées qu'il développait, à d'autre, moments, je me disais que ces idées étaient condamnées par l'évolution contemporaine de la Physique théorique<sup>166</sup> »

La première attitude consistait à reconnaître l'insuffisance des conceptions classiques dans leur aptitude à pouvoir décrire la réalité du monde physique microscopique, et restreindre ainsi de *facto* l'ambition de la physique théorique :

« La physique n'aura donc plus pour but de tracer les lois générales de l'univers indépendamment de ceux qui l'étudient : elle devra se contenter du rôle, beaucoup plus modeste, de représenter les connaissances que chaque physicien a pu acquérir et de dire quelles prévisions ces connaissances lui permettent de faire au sujet des phénomènes à venir<sup>167</sup>. »

Paradoxalement, c'est précisément juste avant son retour à ses premières conceptions que cette position est revendiquée avec le plus de force par Louis de Broglie. Examinant les objections d'Einstein (notamment l'argument EPR) à l'interprétation « orthodoxe » de la mécanique quantique, il décrète ainsi au début des années 1950 l'incompatibilité entre cette interprétation et le réalisme physique :

« Si l'on admet l'existence d'une réalité objective indépendante des procédés de mesure, le point de vue de l'interprétation actuelle des théories quantiques doit être abandonné »<sup>168</sup>.

Et, pour une courte durée, Louis de Broglie choisit encore l'interprétation probabiliste plutôt que le réalisme :

« il est plus justifié de constituer la physique théorique comme devant établir a priori un lien entre les phénomènes effectivement constatables à l'aide de procédés d'observation bien définis<sup>169</sup>. »

La proximité entre la proclamation d'une position si tranchée et son abandon complet laisse songeur quant au niveau de tension auquel était alors parvenu Louis de Broglie.

Une autre attitude adoptée par Louis de Broglie consistait à envisager la possibilité de dépasser cette situation contradictoire à propos de laquelle il ne cachait pas son malaise. Au lendemain de son ralliement aux thèses de Bohr, de Broglie écrit deux lettres à Einstein dans lesquelles il fait part de son insatisfaction quant à l'état de la théorie quantique :

« Je ne suis toujours pas satisfait de l'état actuel de la théorie des ondes et je pense depuis longtemps que c'est vous qui nous indiquerez la bonne voie à suivre<sup>170</sup> »

---

<sup>166</sup> De Broglie (1960), p. 239.

<sup>167</sup> De Broglie (1947-D), p. 149.

<sup>168</sup> De Broglie (1982), p. 154. (Cours donnés à la Sorbonne pendant les années 1950/1951 et 1951/1952 et publiés seulement en 1982. Le manuscrit, déposé aux Archives de l'Académie des sciences (42J/boîte 37), est bien sûr écrit au début des années 1950.

<sup>169</sup> De Broglie (1982), p. 154.

Et,

« Peut-être mon idée des ondes de l'électron a-t-elle constitué un assez important progrès, mais je sais combien il reste à faire pour comprendre vraiment tout cela et se rapprocher un peu de la Vérité. Il nous faut beaucoup travailler...<sup>171</sup> »

Pour dépasser ce stade, Louis de Broglie envisage à de nombreuses reprises une réforme des concepts. Prenant acte que les concepts les plus fondamentaux de la physique classique ne sont plus suffisants pour permettre une description physique des phénomènes naturels, Louis de Broglie indique que le retour à une telle description pourrait être envisagé si on dépassait notamment les concepts d'espace et de temps :

« Tant que nous ne serons pas parvenus à élargir nos concepts [...], nous devons nous évertuer à faire entrer, plus ou moins gauchement, les phénomènes microscopiques dans le cadre de l'espace et du temps et nous aurons le sentiment pénible de vouloir enfermer un joyau dans un écrin qui n'est pas fait pour lui<sup>172</sup> ».

Nous savons qu'une telle réforme ne fut finalement jamais entreprise par Louis de Broglie, puisque celui-ci entrevoit la possibilité d'un retour à une position réaliste de la physique tout en maintenant une description des phénomènes dans le cadre de l'espace et du temps à partir du début des années 1950. Et, comme nous l'avons dit plus haut, le retour à une vision réaliste sera une des motivations avouées de ce revirement :

« Mais alors, dira-t-on, pourquoi modifier l'interprétation actuelle si elle suffit à rendre compte de tous les phénomènes observables, pourquoi introduire toutes ces complications inutiles de double solution, de solutions singulières, etc..., en s'exposant ainsi à se fourvoyer dans des impasses ? À cela, on peut d'abord répondre que le retour à des conceptions claires, cartésiennes, respectant la validité du cadre de l'espace et du temps satisferait certainement beaucoup d'esprits et permettrait non seulement de lever les objections troublantes d'Einstein et de Schrödinger, mais aussi d'éviter certaines conséquences étranges de l'interprétation actuelle. En effet cette interprétation, en cherchant à décrire les phénomènes quantiques uniquement à l'aide de la fonction d'onde continue  $\psi$  dont le caractère statistique est certain, aboutit logiquement à une sorte de « subjectivisme » apparenté à l'idéalisme au sens des philosophes et elle tend à nier l'existence d'une réalité physique indépendante de l'observateur. Or le physicien reste instinctivement, comme Meyerson l'a naguère fortement souligné, un « réaliste » et il a pour cela quelques bonnes raisons ; les interprétations subjectives lui causeront toujours une impression de malaise et je crois que finalement il serait heureux de s'en affranchir<sup>173</sup> ».

Outre cet aspect de confort intellectuel, la posture réaliste a également deux vertus pour Louis de Broglie : elle autorise une explication des phénomènes physiques et elle possède également une fonction heuristique.

#### i- Le réalisme, l'explication et la causalité

---

<sup>170</sup> De Broglie (1989-A).

<sup>171</sup> De Broglie (1989-B).

<sup>172</sup> De Broglie (1937-A), p. 229.

<sup>173</sup> De Broglie (1952-A), pp. 140-141.

Louis de Broglie et les élèves qui l'ont suivi dans cette voie ont souvent parlé « d'interprétation causale » à propos des tentatives d'interprétation de la mécanique quantique qu'ils ont proposées. Cette terminologie a souvent poussé les commentateurs à penser que le problème de la mécanique quantique était pour eux la question du déterminisme. Or, Louis de Broglie a écrit très clairement que tel n'était pas le cas :

« Il y a un point que je tiens à bien préciser. Si je me suis à nouveau intéressé à une réinterprétation causale de la mécanique ondulatoire, ce n'est pas parce que je suis systématiquement attaché à l'idée de déterminisme : personnellement, je n'ai pas sur ce problème des opinions philosophiques préconçues. Mais un examen minutieux des objections faites à diverses reprises par Einstein et par Schrödinger à l'interprétation actuelle m'a amené, d'accord avec eux, à la conclusion que cette interprétation, bien que certainement exacte en tant que théorie statistique, n'est pas une description complète de la réalité physique<sup>174</sup>... »

Si causalité et déterminisme sont souvent confondus chez beaucoup de physiciens, Louis de Broglie distingue ces deux notions. Déjà, dans sa période orthodoxe, de Broglie soulignait que si la mécanique quantique avait abandonné le déterminisme, entendu dans le sens d'une parfaite prévisibilité de principe des phénomènes naturels, elle permettrait de conserver une sorte de principe de causalité élargie :

« Considérons un phénomène A auquel succède toujours l'un quelconque des phénomènes  $B_1, B_2, B_3, \dots$ . Si, de plus, aucun des phénomènes  $B_1, B_2, B_3, \dots$  ne se produit si A ne s'est pas produit, on pourra dire, en adoptant une définition large de la causalité, que A est la cause des phénomènes  $B_1, B_2, B_3, \dots$ <sup>175</sup> ».

Pour illustrer cet énoncé, Louis de Broglie prend l'exemple de scintillations sur un écran (phénomène B) causées par l'émission d'électron par un canon (phénomène A). Si la localisation de la scintillation n'est pas rigoureusement déterminée par l'application de la mécanique quantique au problème, il n'en reste pas moins que l'on peut expliquer son apparition par une cause qui est l'activation d'un canon à électron à proximité. Bien entendu, Louis de Broglie ne se contentera plus d'une définition de la causalité si lâche après son revirement de 1951. Lecteur de Meyerson, il retrouvera dans son œuvre la différence qu'il convient de faire entre le déterminisme (qui renvoie à la notion de légalité) et la causalité (qui renvoie à la notion d'explication) :

« Pour Meyerson, la Science ne cherche pas uniquement à formuler les lois comme on l'affirme souvent : elle recherche aussi nécessairement les causes. Pour lui, si la Science se contentait de la « Légalité » sans se préoccuper de la « Causalité », elle deviendrait analogue à la Magie. Il avait raison et c'est sans doute, pourrions-nous ajouter, parce que la Physique quantique contemporaine a partiellement renoncé à la causalité que certains de ses aspects peuvent prendre, suivant une malicieuse remarque de M. Schrödinger, un caractère de magie. Pour Meyerson, la véritable **explication** scientifique recherche nécessairement la **causalité** conçue sous la forme d'une persistance ou d'un lien causal dans le temps, d'une sorte de préformation du conséquent dans ses antécédents. C'est en ce sens, selon lui, qu'expliquer c'est identifier et que la causalité va plus loin que la légalité parce qu'elle exige une certaine identité dans le temps des éléments de la **réalité** physique<sup>176</sup> »

---

<sup>174</sup> Archives de l'Académie des Sciences (42J/ boîte 26), de Broglie (1957).

<sup>175</sup> De Broglie (1937-B).

<sup>176</sup> De Broglie (1960), p. 239. Les termes « causalité », « explication » et « réalité » sont soulignés par moi.

Autrement dit, pour Louis de Broglie comme pour Meyerson, un des rôles de la physique est bien d'expliquer la réalité, et c'est la recherche de causes qui permet une telle explication. L'objection qui pourrait être faite ici est qu'il ne faudrait pas attribuer cette pensée à Louis de Broglie qui ne fait dans ce passage que présenter la pensée de Meyerson. Je propose deux éléments de réponses. Le premier est que Louis de Broglie donne ici explicitement son accord, et n'a d'ailleurs jamais caché son adhésion à la philosophie de Meyerson (son élève Georges Lochak insiste sur ce point dans sa biographie). Le deuxième est que l'on trouve dans l'œuvre de Louis de Broglie des remarques qui peuvent parfois sembler mystérieuses mais qui s'éclairent lorsqu'on comprend que pour lui, l'une des tâches que doit remplir la physique théorique est de fournir une explication.

Je propose deux exemples pour illustrer ce second point. Le premier est tiré des critiques qu'adresse de Broglie à l'interprétation statistique de la fonction d'onde. À travers les textes qui succèdent à son revirement, il fait remarquer à de nombreuses reprises l'ambiguïté du statut physique de la fonction d'onde dans l'interprétation orthodoxe de la mécanique quantique. Selon lui, à la lecture des écrits portant sur cette théorie, certains passages laissent à penser que la fonction d'onde représente une réalité physique. Or, fait-il remarquer, une analyse poussée de la théorie ne rend pas cohérente l'attribution d'une nature physique à l'onde avec son interprétation probabiliste, interprétation qui plaide, quant à elle, pour un statut purement épistémique de l'objet. Mais alors, selon cette dernière conception, la mécanique quantique perd pour Louis de Broglie tout pouvoir explicatif :

« Comment une simple représentation de probabilités, qui a forcément un caractère subjectif, pourrait déterminer<sup>177</sup> des phénomènes physiques observables comme si une simple table de mortalité pouvait être la cause des morts individuels ?<sup>178</sup> »

Un second exemple provient du reproche adressé au concept de complémentarité de Bohr, quant à son incapacité à expliquer la dualité onde-corpuscule :

« Si l'emploi du mot « complémentarité » sert seulement à **traduire** l'apparition successive d'apparences corpusculaires et d'apparences ondulatoires dans des phénomènes indéniables, cet emploi est entièrement légitime, mais en revanche, il ne constitue en aucune façon une **explication** réelle de la dualité des ondes et des corpuscules. On peut comparer la complémentarité à la vertu dormitive de l'opium dont s'est moqué Molière : il est parfaitement légitime de traduire les propriétés soporifiques de l'opium en attribuant à cette substance une vertu dormitive, mais il faut bien se garder de voir dans ces mots une explication de ces propriétés.<sup>179</sup> »

En bref, un des plus graves griefs de l'interprétation de Copenhague selon Louis de Broglie est qu'elle ne fournit aucune explication physique de la réalité. C'est également de cette manière que l'on peut comprendre certaines réserves que Louis de Broglie a toujours émises, même pendant sa période « orthodoxe », quant à la portée du formalisme de la théorie quantique des champs ou à celui de la seconde quantification<sup>180</sup>. Ces deux dernières théories permettent, à partir d'un formalisme en apparence entièrement ondulatoire, d'introduire des discontinuités dans les valeurs des grandeurs physiques attachées au système. On peut par exemple, à partir d'une équation d'onde, construire un

<sup>177</sup> Dans le cadre de la définition que l'on a attribuée aux différents termes dans ce chapitre, le verbe « causer » traduirait mieux le sens que Louis de Broglie voulait donner à cette phrase.

<sup>178</sup> De Broglie (1966-A), p. 51.

<sup>179</sup> De Broglie (1961), p. 20. Les mots en gras sont soulignés par moi.

<sup>180</sup> Bien que Louis de Broglie ait explicitement distingué ces deux formalismes (nous y reviendrons plus tard), il n'est pas utile ici de le faire.



Hamiltonien (à partir duquel on dérive, grâce aux équations d'Hamilton, l'équation d'onde en question) qui représente l'énergie du système. La seconde quantification, qui consiste à donner à l'amplitude de l'onde et à son moment canoniquement conjugué le statut d'opérateur respectant certaines relations de commutation canonique, permet de déterminer les valeurs propres de l'Hamiltonien, qui prennent alors des valeurs discrètes introduisant ainsi l'aspect corpusculaire. Pascual Jordan, qui fut un des grands initiateurs de ce formalisme,<sup>181</sup> voyait dans celui-ci l'explication fondamentale de l'existence des particules :

« the solution to the problem of understanding the existence of elementary particles – light quanta, electrons, protons - can be found by using quantization<sup>182</sup> ».

À l'inverse, si ce formalisme permet chez Louis de Broglie de **traduire** formellement l'existence des particules, il n'en donne en aucune manière une **explication** :

« Le formalisme de la seconde quantification permet donc de **traduire** le fait que, si l'on détermine le nombre des particules du système se trouvant dans l'état  $\psi_i$ , on trouvera toujours un nombre entier. Il n'est certainement pas possible de penser que l'on a ainsi démontré ou **expliqué** la structure corpusculaire de la matière, mais on a trouvé un formalisme qui, dans le cas étudié des systèmes à états symétriques, traduit cette structure<sup>183</sup> ».

### Quel type d'explication est légitime ?

On retrouve dans ces différents exemples pris pourtant dans des textes et à des époques variées la même opposition chez Louis de Broglie entre la notion de traduction (d'un phénomène, d'un aspect de la réalité ou encore de liens de corrélations entre phénomènes ; que ce soit par une loi, une relation mathématique ou encore un terme) et la notion d'explication scientifique. Cela pose la question de savoir quel type d'explications Louis de Broglie considère comme légitime. Pour un certain nombre de physiciens de tendance formaliste<sup>184</sup>, les prescriptions du formalisme mathématique d'une théorie n'ont pas besoin d'être complétées par aucune autre sorte d'explication, à partir du moment où elles sont suffisantes pour rendre compte de la totalité des observations potentiellement constatables. Le sentiment existe d'avoir une certaine compréhension du phénomène simplement s'il peut être déduit du formalisme en question. La lecture de la citation précédente semble indiquer que tel n'est pas le cas chez Louis de Broglie. Une telle attitude peut faire écho à une phrase de Schrödinger prononcée lors du Conseil Solvay 1927 :

« Il ne m'est pas encore possible, pour le moment, de voir une réponse à une question physique dans l'assertion que certaines grandeurs sont soumises à une algèbre non commutative, surtout quand il s'agit de grandeurs qui doivent représenter des nombres d'atomes<sup>185</sup> »

<sup>181</sup> Voir par exemple Darrigol (1984) ou encore Schweber (1994).

<sup>182</sup> Citée à partir de Schweber (1994), p. 42.

<sup>183</sup> De Broglie (1940), p. 223. Termes soulignés par moi.

<sup>184</sup> Voir plus bas pour une discussion plus approfondie de la dénomination « formaliste ».

<sup>185</sup> Conseil Solvay(1928) (dans les discussions du rapport de Schrödinger). Schrödinger fait ici référence au fait qu'en théorie quantique des champs (ou en seconde quantification), le nombre d'atomes (ou de particules)  $N$  associés à chaque mode de l'onde devient un opérateur qui, par exemple, respecte la loi de non-commutation suivante :  $N\phi - \phi N = -i\hbar$  (où  $\phi$  est la phase de l'onde en question) qui détermine les valeurs propres (c'est-à-dire les valeurs possibles) de  $N$ .



Car pour Louis de Broglie, le langage mathématique, bien qu'outil de précision indispensable pour la physique, ne suffit pas par sa nature abstraite à rendre entièrement compte du « caractère concret du monde physique »<sup>186</sup>. On retrouve cette prise de distance à l'égard du formalisme dans son refus d'interpréter la Relativité comme traduisant une sorte « de spatialisation du temps », ceci en désaccord avec son élève Olivier Costa de Beauregard<sup>187</sup>, mais en accord avec le philosophe Henri Bergson, comme le montre ce passage d'un texte consacré à la pensée du philosophe :

« Notre intelligence projette en quelque sorte la succession des événements sur un axe homogène et ne veut plus voir dans l'écoulement du temps qu'un déplacement le long de cet axe. Il est fort possible, en effet, qu'en schématisant ainsi à l'excès, elle laisse échapper certaines propriétés essentielles du temps réel. [...]

Il n'en reste pas moins vrai que la représentation schématique du temps employée par la science classique et poussée à ses extrêmes conséquences par la théorie de la Relativité peut être un schéma commode, mais fallacieux, qui nous masque une partie du caractère véritable de l'écoulement des choses. Et, nous l'avons vu, même pour l'étendue, il n'est pas en somme certain qu'elle puisse se laisser entièrement décrire par des localisations dans le cadre homogène de l'espace géométrique<sup>188</sup> »

Ce scepticisme à l'égard du formalisme est exprimé avec encore plus de clarté dans le passage suivant :

« Il ne faut d'ailleurs pas être dupe des représentations mathématiques. Si des concepts abstraits comme ceux de l'espace de Hilbert en Physique quantique, de l'espace de configuration en Mécanique classique et en Mécanique ondulatoire, de l'extension-en-phase en Thermodynamique statistique constituent des auxiliaires très clairs et très utiles pour l'exposé des théories, ce serait une grave erreur de leur attribuer une réalité physique qu'ils ne peuvent avoir et de les considérer comme le cadre véritable du déroulement des phénomènes, déroulement qui s'opère toujours, pensons-nous, dans le cadre de l'espace et du temps<sup>189</sup>. »

Car si la compréhension physique ne se situe pas dans la compréhension du formalisme mathématique chez Louis de Broglie, elle se trouve incontestablement dans la représentation des phénomènes physiques dans le cadre de l'espace et du temps (ou, pendant la période « orthodoxe, quelque chose qui s'y substituerait) :

« La représentation concrète de la réalité physique dans le cadre de l'espace et du temps avec connexion causale a été à l'origine de tous les progrès de la science moderne : elle est conforme aux tendances profondes de notre esprit et nous cessons de bien comprendre si nous nous en écartons<sup>190</sup> ».

Bien entendu, cet idéal est ici exprimé après son retour aux tentatives d'interprétation causale de la mécanique quantique, et après avoir été mis entre parenthèse pendant les vingt-cinq ans de sa période orthodoxe. Néanmoins, même pendant cette période orthodoxe, Louis de Broglie exprime cette situation comme une restriction aux ambitions traditionnelles de la physique, et il émet le souhait de la dépasser (à travers une réforme des concepts d'espace et de temps), ce qui tend à indiquer que cet idéal ne disparaît jamais totalement chez lui et peut sans doute être qualifié d'invariant de sa pensée. En outre, l'attrait pour une visualisation des phénomènes ne disparaît pas durant cette même période, comme le montre le fait qu'il préférera toujours le caractère imagé de la mécanique ondulatoire à celui

<sup>186</sup> Voir de Broglie (1966- C), p. 23.

<sup>187</sup> Voir Beauregard (1963).

<sup>188</sup> De Broglie (1941-A), p. 195-196.

<sup>189</sup> De Broglie (1966-B), p. 47.

<sup>190</sup> De Broglie (1966-B), p. 43.

plus formel de la mécanique quantique « hilbertienne ». Ce dernier point s'explique également par le fait que la représentation imagée des phénomènes physiques est pour Louis de Broglie un des outils heuristiques les plus puissants du théoricien.

## ii- Le réalisme et le pouvoir heuristique des images

Il est assez savoureux de comparer deux textes de Louis de Broglie portant sur des thèmes très proches mais écrits à un intervalle de temps de l'ordre de la vingtaine d'années. Le premier, écrit alors que Louis de Broglie adhère encore à l'interprétation orthodoxe de la mécanique quantique, s'intitule : « Théories abstraites et représentations concrètes dans la physique moderne<sup>191</sup> ». Le second, écrit après son revirement, et dont nous avons déjà cité des extraits, a pour titre : « Les représentations concrètes en microphysique<sup>192</sup> ». Nous avons vu, que dans le second, Louis de Broglie rejette toutes prétentions aux mathématiques d'être le support d'une réelle explication scientifique, réservant ce rôle aux « représentations concrètes ». Ce point de vue, bien que très largement mis en question dans le premier texte, y est néanmoins résumé :

« Pour les adeptes de la première école, c'est la représentation concrète placée à la base d'une théorie qui est la chose essentielle : c'est elle qui révèle le sens véritable des formules, c'est elle qui nous fait pénétrer dans la réalité physique profonde<sup>193</sup> ».

Cette première école dont il est question est celle des physiciens à l'esprit intuitif, qui n'ont de cesse que de « chercher à placer à la base des théories certaines représentations concrètes construites à l'aide d'images empruntées à la connaissance que nos sens procurent des objets matériels dont nous sommes entourés à notre échelle dans la vie courante<sup>194</sup> ». À cette école, dont Louis de Broglie souligne dans ce texte toutes les limites<sup>195</sup>, mais à laquelle il est peu douteux qu'il s'identifie, on peut rattacher par exemple les physiciens atomistes de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et du début du XX<sup>e</sup> siècle, qui ont eu la hardiesse d'interpréter les lois de la thermodynamique avec la théorie cinétique des gaz. Elle s'oppose à une autre école de pensée, celle des « formalistes », « à l'esprit plus abstrait » pour qui l'essentiel est « l'ensemble des relations mathématiques obtenues par la théorie », et non pas « les images plus ou moins intuitives, souvent plus ou moins naïves, qui ont pu aider les fondateurs de la théorie en faisant participer leur imagination au travail de leur raison. » Cette deuxième école est représentée par exemple par les tenants de l'école énergétiste du début du XX<sup>e</sup> siècle, qui prenait comme archétype théorique la thermodynamique classique, et dont un des illustres représentants était Pierre Duhem.

Louis de Broglie identifie chacune de ces deux écoles respectivement au réalisme et à l'idéalisme. C'est parce que le théoricien intuitif croit en la réalité du monde extérieur qu'il veut s'en faire une image. Or, à ce stade, Louis de Broglie concède que l'évolution de la physique semble

---

<sup>191</sup> De Broglie (1941-C)

<sup>192</sup> De Broglie (1966-C).

<sup>193</sup> De Broglie (1941-C), p. 92.

<sup>194</sup> *Ibid.*

<sup>195</sup> L'argument qu'il donne alors est que les images concrètes, qui sont tirées par abstraction et idéalisation des objets de la vie quotidienne, n'ont aucune raison de pouvoir s'adapter à une réalité physique si éloignée de notre expérience immédiate, et se révèlent finalement naïves.

donner raison aux formalistes : que reste-t-il en effet des représentations concrètes de l'atomisme ou encore du modèle de l'atome de Bohr dans le cadre des nouvelles théories quantiques ?

« Les représentations concrètes des physiciens intuitifs et des premiers pionniers de l'atomisme paraissent donc être purement fictives.

S'il en est ainsi, comment pourrions-nous encore progresser dans l'étude des domaines de la Physique où les images fournies par nos sens n'ont plus de valeur réelle ? Ce sera en admettant d'abord dans nos raisonnements, en vérifiant ensuite par l'expérience, qu'il existe entre les phénomènes observables des relations susceptibles d'être rattachées les unes aux autres au sein de théories cohérentes. C'est bien là, nous l'avons vu, le point de vue des physiciens de l'école abstraite dont l'opinion apparaît comme entièrement justifiée<sup>196</sup> ».

Nous savons que cette position sera farouchement combattue par le même de Broglie à partir des années 1950. Il ne prit pourtant jamais véritablement le soin de contester le raisonnement qui y menait. Rien ne garantit effectivement que les représentations que nous sommes capables de forger à partir de notre expérience du monde macroscopique puissent être transposables à l'échelle microscopique. Même après son revirement, Louis de Broglie ne prétendait pas garantir cette possibilité : il ne s'agissait pas d'une nécessité logique ou philosophique, mais d'un programme de recherche dont on pouvait mesurer la faisabilité uniquement après y avoir consacré les efforts nécessaires, comme il le déclare d'ailleurs clairement en 1953 :

« Il est permis de croire qu'un changement de point de vue comportant un retour aux images spatio-temporelles améliorerait la situation : évidemment ce n'est là qu'une espérance, un chèque en blanc, dirait M. Pauli, mais cette possibilité ne doit pas, pensons-nous, être a priori complètement exclue et il faut éviter le danger qu'une foi trop grande dans l'interprétation purement probabiliste de la Physique quantique ne finisse par la rendre stérile.<sup>197</sup> »

Ce qui est en jeu ici n'est pas tant la nécessité logique de l'aboutissement d'une telle tentative mais le devoir méthodologique de l'entreprendre<sup>198</sup>. Pour Louis de Broglie, le recours à des images physiques dans le cadre de l'espace et du temps reste le plus puissant outil heuristique du physicien théoricien, et il serait grandement handicapé s'il devait s'en passer. Or, nous pouvons clairement trouver une permanence de la pensée de Louis de Broglie sur ce point, comme le montre un retour au texte « Théories abstraites et représentations concrètes dans la physique moderne », dans lequel, après avoir démontré l'absence de garantie épistémologique que nous offrent les représentations concrètes, Louis de Broglie prend bien soin d'insister sur le fait qu'elles sont néanmoins à l'origine des progrès les plus significatifs de la physique :

« Maintenant encore, les théories quantiques actuelles, malgré leur tendance abstraite, admettent ces cadres d'une façon plus ou moins avouée et utilisent les débris de conceptions dont elles nient par ailleurs l'exactitude. Quand on fait en Mécanique ondulatoire la théorie de l'atome, on commence par rappeler le modèle planétaire de Bohr et c'est à l'aide de cette image qu'on forme l'équation de propagation pour l'onde  $\psi$  de l'électron dans l'atome ; de cette équation obtenue, il est

---

<sup>196</sup> De Broglie (1941-C), p. 98.

<sup>197</sup> De Broglie (1952), p. 141.

<sup>198</sup> Louis de Broglie se rapproche ici du réalisme méthodologique d'Einstein, énoncé comme suit : « Cette thèse concernant la réalité n'a pas le sens d'un énoncé clair en soi, en raison de sa nature « métaphysique » ; elle a seulement le caractère propre d'un *programme* » (George (1953), p. 7.) La spécificité du réalisme de Louis de Broglie par rapport à celui d'Einstein consiste en ce que le premier met plus l'accent sur l'exigence de visualisation des phénomènes.

loisible de se placer au point de vue abstrait, de prendre cette équation pour base et de réduire toute la théorie de l'atome à un système de formules. Mais aurait-on même pu poser le problème si l'on n'avait pas été guidé par le modèle planétaire ? Il est certain que nos représentations concrètes deviennent de plus en plus inexactes au fur et à mesure que nous voulons analyser les phénomènes à une échelle plus fine. Mais combien ces représentations nous sont utiles ! On peut même se demander ce qui arriverait si, en prolongeant l'étude de l'infiniment petit, nous arrivions à des domaines où nos représentations concrètes habituelles n'auraient plus absolument aucun sens. Pourrions-nous continuer à progresser ? Cela me paraît douteux car, en somme, nous ne pouvons penser qu'à l'aide d'images extraites de notre intuition sensible<sup>199</sup>. »

Pour conclure, si nous devons résumer la position épistémologique explicitement soutenue par Louis de Broglie en la nommant, nous pourrions parler de *réalisme représentationnel*. Le but ultime et le moteur de la physique théorique sont la compréhension du réel. Dans cette perspective, le rôle de la représentation se révèle double : corollaire à une véritable compréhension des phénomènes, elle permet de susciter des images qui brisent le cercle de la déduction et est ainsi indissociablement liée à l'acte de création scientifique<sup>200</sup>. Ce réalisme fut, dans une certaine mesure, assez terni durant la période orthodoxe de Louis de Broglie : ainsi, l'exigence d'une véritable compréhension du monde physique fut mise entre parenthèse par la situation que le succès de la physique quantique avait imposée à la physique théorique. Pour autant, nous pouvons dégager de cette étude des textes de Louis de Broglie, écrits à différentes périodes, ce qui me semble être les invariants de sa pensée épistémologique et qui peuvent se résumer brièvement de la manière suivante : les représentations concrètes sont indispensables tant à la création théorique qu'à la compréhension de la réalité physique, cette compréhension restant à la fois le moteur principal et le but ultime de toute entreprise scientifique. Nous examinerons dans la partie suivante dans quelle mesure cette conception de la physique théorique se traduit dans la production purement scientifique de Louis de Broglie.

## 2- La physique théorique pratiquée par Louis de Broglie

J'ai tenté ci-dessus de dégager la philosophie scientifique de Louis de Broglie, telle qu'il l'a explicitement affichée dans divers écrits à caractère non technique. Cette partie est quant à elle réservée à l'étude de ses travaux scientifiques. Je propose tout d'abord un éclairage sur la logique qui semble soutenir les choix de Louis de Broglie dans les programmes de recherche<sup>201</sup> qu'il s'est fixés au cours de sa carrière, en les remettant dans le contexte de la physique théorique de l'époque (a). Je propose ensuite de dégager le style de recherche de Louis de Broglie (b) et je discute enfin de ses critères de sélections théoriques (c). Cette partie permettra de compléter et de corriger la précédente, et de comprendre plus profondément la carrière de ce physicien atypique.

### a) Un éclairage sur la stratégie de recherche d'un théoricien

---

<sup>199</sup> De Broglie (1941-C), p. 107.

<sup>200</sup> Voir également Louis de Broglie, « déduction et induction dans la recherche scientifique », (dans 1956-A, pp. 258-262), texte dans lequel Louis de Broglie fait correspondre l'acte de déduction à la spécialisation de l'école formaliste, et l'acte d'induction à celle de l'école des intuitifs.

<sup>201</sup> Malgré l'emploi de l'expression « programme de recherche », je ne cherche ici pas à faire référence à Lakatos. Cette expression est ici à comprendre au sens de « grand projet scientifique ».

L'ensemble de la carrière scientifique de Louis de Broglie se structure autour de trois grands programmes de recherche : la recherche d'une théorie de la dualité onde-corpuscule entre 1923 et 1928, la recherche d'une théorie du photon puis d'une théorie générale des particules à spin pendant les années 1930 et 1940, enfin le « programme causal », c'est-à-dire la tentative de réinterprétation de la mécanique quantique à partir des années 1950. Ces programmes de recherche sont séparés de quelques périodes de flottement.

i- La dualité onde-corpuscule (1923-1928) : premier programme de recherche

Nous avons vu qu'en 1934, Gustave Juvet proposait de définir la tâche de la physique théorique comme étant *de coordonner et de prévoir les progrès de la physique expérimentale*. Une telle conception, qui subordonne la théorie à l'expérience, apparaît très clairement chez les physiciens français d'après guerre mondiale (voir la citation de Maurice Lévy plus haut). Schweber souligne que cette conception s'est imposée très nettement aux États-Unis à partir des années 1930 :

« As Rosenberg has emphasized, to understand the social underpinning of a profession, we must « to some extent at least see it as a marketplace phenomenon ». In the case of theoretical physicists, experimentalists made the market<sup>202</sup> ».

En étudiant les premiers travaux de Louis de Broglie, nous avons vu que ceux-ci correspondent plutôt bien à ces caractérisations de la physique théorique : il cherche effectivement avant tout à coordonner et prédire les données expérimentales fournies par les expérimentateurs du laboratoire de son frère. Pourtant, très vite, les ambitions du théoricien se révèlent beaucoup plus grandes, et il entrevoit dans l'idée de la dualité onde-corpuscule une monumentale synthèse théorique des deux principaux objets de la physique classique : les champs et les particules. À partir de ce moment, Louis de Broglie prend d'assez grandes distances avec les préoccupations immédiates des expérimentateurs afin de se préoccuper uniquement de problèmes très généraux et fondamentaux. De fait, si sa thèse permet de fournir une prédiction expérimentale nouvelle (la diffraction électronique), son succès le plus impressionnant réside avant tout dans la réinterprétation de lois déjà connues en les refondant sur de nouvelles bases conceptuelles : quantification des niveaux d'énergie de l'électron au sein de l'atome de Bohr, division de l'espace de phase de la physique statistique en cellules de volume  $h^3$ , interprétation de la similarité entre le principe de moindre action et le principe de Fermat permettant la fusion conceptuelle de l'optique et de la mécanique. Les bénéfices pour la coordination de la physique expérimentale qu'apporte une telle reconceptualisation restent relativement modestes à court terme. En revanche, parce qu'elle débouche sur des prolongements (notamment ceux de Schrödinger) qui montreront toute leur fécondité expérimentale plus tard, ces bénéfices sont beaucoup plus importants sur le long terme. Il semble que ce succès ait durablement fixé la stratégie de Louis de Broglie dans le choix de ses sujets d'études.

Nous ne trouvons pas non plus beaucoup de volonté de la part de Louis de Broglie de chercher à appliquer immédiatement les idées nouvelles contenues dans sa thèse après sa publication en 1925. Cette dernière, effectivement, laisse en suspens de nombreuses questions (le lien exact entre la particule et l'onde, la nature de l'onde...) auxquelles il convient tout d'abord de répondre et c'est à la

---

<sup>202</sup> Schweber (1986), p. 72.

résolution de ces problèmes conceptuels que de Broglie tente en priorité de se concentrer. Pour ce faire, il développe la théorie de la double solution et sa version simplifiée, celle de l'onde-pilote<sup>203</sup>.

Pour Louis de Broglie, l'objectif de la mécanique ondulatoire est avant tout « d'opérer une synthèse entre la dynamique du point matériel et la théorie des ondes<sup>204</sup> ». Il s'agit de faire « admettre en Optique la notion de points de concentration de l'énergie radiante », et d'« introduire les conceptions de la théorie des Ondes dans l'image que nous nous faisons des points matériels, afin de rendre compte de l'intervention des quanta en mécanique et des phénomènes intraatomiques<sup>205</sup> ». Bref, il s'agit de mettre de l'ordre dans la théorie, de se « représenter » les phénomènes, de « donner un sens clair » aux équations, mais surtout, de « conserver [...] les déterminismes des phénomènes individuels » contestés par les derniers travaux de Max Born. Le travail de fondation théorique n'est pas encore achevé, et les tentatives d'autres auteurs ne sont pas satisfaisantes pour de Broglie : Max Born, on l'a vu, renonce au déterminisme, alors que Schrödinger renonce au caractère corpusculaire de la matière tout en utilisant un espace de configuration dont les axes sont censés justement représenter les coordonnées de corpuscules. L'édifice conceptuel repose donc sur des bases bien trop fragiles et l'urgence première est de solidifier les fondations. On peut alors comprendre que le travail de Louis de Broglie se restreindra à préciser le sens des concepts, à dégager les équations fondamentales de la théorie et leurs solutions les plus générales. Si des applications sont effectuées (interférences, pression du rayonnement exercé sur un miroir), leur rôle est d'illustrer la théorie et en aucun cas de répondre à une des préoccupations immédiates des expérimentateurs. D'ailleurs, la théorie de la double solution, beaucoup plus complexe mathématiquement que la mécanique ondulatoire de Schrödinger, serait techniquement difficile à appliquer à un problème de physique atomique par exemple, et le bénéfice pour l'expérimentateur serait contestable (l'intérêt pour le spectroscopiste de connaître la trajectoire des électrons au sein des atomes est très faible)<sup>206</sup>. Pourtant, devant les difficultés théoriques de la théorie de la double solution, devant sa complexité mathématique, et devant, enfin, les objections adressées notamment par les membres de « l'école de Copenhague », Louis de Broglie finira par renoncer à sa théorie et à accepter l'interprétation probabiliste de la mécanique ondulatoire.

ii- À la recherche d'une théorie quantique de la lumière et d'une théorie générale des particules à spin (1932-1945)

Un tel abandon a de lourdes conséquences sur les orientations de recherche du physicien. Il se traduit par une diminution drastique de sa production : alors qu'il publiait entre 1920 et 1927 pas moins de 27 articles parus dans les *Notes aux Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, soit une moyenne de plus de trois articles par an (sans compter les articles, moins nombreux, parus dans le *Journal de Physique*), il ne publie aucune note dans les quatre années qui suivent. Certes, l'abandon de sa théorie n'est pas la seule explication à cette absence de production. L'année 1928 est également celle où Louis de Broglie obtient un poste de maître de conférence à la Sorbonne. D'autre part, il commence à partir de cette période une vaste activité de diffusion et d'enseignement des nouvelles

---

<sup>203</sup> En comparaison, il est intéressant de constater que Max Born développe son interprétation statistique de la fonction d'onde en essayant de résoudre un problème très concret : la diffusion d'une particule par un atome.

<sup>204</sup> De Broglie (1927-A).

<sup>205</sup> *Ibid.*

<sup>206</sup> Je fais plus loin, dans la partie b), une présentation de la théorie de la double solution et celle de l'onde pilote. Il suffit ici d'indiquer que selon ces théories, la position du corpuscule est toujours précisément localisée contrairement à la mécanique ondulatoire de Schrödinger. L'onde coexiste avec la particule de façon à ce que cette dernière soit guidée par la première.



théories scientifiques, ou à propos de leurs conséquences philosophiques, que ce soit sous forme d'articles de vulgarisation, de brochures (il prend une part très active dans le lancement d'une nouvelle série de publications fondée en 1927, les *Actualités scientifiques et industrielles*) ou encore de manuels (il publie pratiquement chaque année le contenu du cours qu'il dispense à la Sorbonne). Cependant, le contexte scientifique de l'époque paraît beaucoup plus déterminant. La communauté des physiciens considère désormais que les bases de la mécanique quantique sont établies : l'heure est clairement aux applications. Bien sûr, des questions fondamentales restent en suspens : comment réconcilier, par exemple, la mécanique quantique avec la théorie de la relativité, ou question connexe, comment décrire quantiquement les interactions électromagnétiques. Mais les réponses à ces questions sont avant tout formelles, ce qui ne favorise pas le style de recherche<sup>207</sup> de Louis de Broglie : il s'agit de la découverte de l'équation de Dirac en 1928 et du développement de la théorie quantique des champs ou de la seconde quantification par Jordan, Heisenberg, Pauli, Dirac et quelques autres. D'autre part, des domaines d'applications de la mécanique ondulatoire s'ouvrent : notamment la physique atomique et moléculaire, la théorie électronique des métaux ou les statistiques quantiques. Bien que Louis de Broglie ne se désintéresse pas de ces questions, il considère sans doute que le domaine des applications n'est pas le sien.

Le développement de la physique quantique relativiste et de la théorie quantique des champs connaît de très beaux succès pendant le tournant des années 1930 : formulation de la théorie intégralement quantique (sans faire appel au principe de correspondance) de l'émission spontanée et des largeurs des raies spectrales des atomes, du spin, du moment magnétique de l'électron et prédiction de l'existence du positron (par Dirac respectivement en 1927, 1928 et 1931), ou encore calcul des sections efficaces de diffusion de la lumière par les électrons (par Klein et Nishina en 1929). Malgré ces succès, des difficultés très graves persistent : l'apparition de quantités infinies dans les calculs de perturbation est la plus dramatique d'entre elles puisqu'elle empêche tout calcul d'aller à son terme. Mais d'autres difficultés, auxquelles des réponses formelles sont cependant très vite proposées, existent : le problème des énergies négatives dans la théorie de Dirac (qui se voit proposer deux solutions concurrentes, la théorie des trous par Dirac et la seconde quantification de la théorie), l'énergie infinie associée au vide (qui peut être supprimée grâce à un réagencement de l'ordre des opérateurs dans le Lagrangien du champ), ou encore les problèmes liés aux excès du nombre de variables du champ électromagnétique par rapport au nombre de degrés de liberté réels (pour lesquels Heisenberg et Fermi proposeront des solutions formelles)<sup>208</sup>.

C'est seulement en 1932 que Louis de Broglie rentre dans ce nouveau champ de recherche. Et là encore, sa démarche est profondément originale. Il n'ignore pas les difficultés auxquelles les nouveaux développements de la physique quantique relativiste se heurtent. Pourtant sa stratégie ne consiste pas à s'y confronter directement. En réalité, sa principale préoccupation est tout autre.

Nous l'avons vu précédemment, le sens premier que Louis de Broglie attribue à son travail de thèse est d'avoir permis le rapprochement entre l'optique et la mécanique, c'est-à-dire entre la physique de la lumière et celle de la matière. À travers l'identification du principe de Fermat avec celui de Maupertuis, ce rapprochement devait logiquement mener à une véritable unification quant à la description de ces deux entités physiques. Quelquefois trop pressé d'y parvenir, ce désir d'unification

---

<sup>207</sup> Nous aborderons plus profondément la question d'une classification des différents styles de recherche des physiciens théoriciens dans la section suivante.

<sup>208</sup> Voir Schweber (1994) ou Darrigol (1984).



lui coûta même peut-être la découverte de la statistique de Bose-Einstein<sup>209</sup>. Pourtant, ces attentes furent quelque peu déçues par le développement de la mécanique ondulatoire. À cela, il existe plusieurs raisons. D'une part, la mécanique ondulatoire de Schrödinger n'est pas relativiste, et ne peut donc en aucun cas traiter une particule sans masse telle que le photon. D'autre part, la fonction d'onde de Schrödinger représente une onde se propageant dans un espace polydimensionnel et ne prend pas en compte la polarisation de la lumière. Enfin, contrairement à l'électron (croyait-on), le photon est susceptible d'être créé et de s'annihiler au contact de la matière. Pour ces différentes raisons, beaucoup de théoriciens, et non des moindres, pensaient que le rapport entre la description théorique de la matière et celle de la lumière ne devait pas dépasser la simple analogie. Ainsi Dirac insistait sur le fait qu'il n'y avait pas pour l'électron, contrairement au photon, de description classique en termes de champ, et qu'en conséquence, l'électron et le photon étaient de natures fondamentalement différentes<sup>210</sup>. Cette situation ne pouvait que laisser Louis de Broglie dans un état d'insatisfaction profonde. Ce qui était en jeu ici n'était rien de moins que la justesse des intuitions qui le menèrent à sa découverte des ondes de matière. Comme il le reconnaîtra ultérieurement :

« Il eut été vraiment trop paradoxal que la mécanique ondulatoire, ayant été essentiellement suggérée par les phénomènes lumineux, ne parvienne pas à nous fournir une représentation cohérente de ces phénomènes eux-mêmes <sup>211</sup> ».

Un des premiers éléments de réponses à ce « paradoxe » vint de la découverte de l'équation de Dirac. Cette équation, qui permet à partir d'un nombre très restreint d'exigences (conservation de la probabilité et compatibilité avec la théorie de la relativité) à rendre compte du spin et du moment magnétique de l'électron, est une étape décisive dans la constitution d'une mécanique ondulatoire relativiste. Elle permettait non seulement d'éviter quelques-uns des écueils que rencontrait l'équation d'onde relativiste de Klein-Gordon (non-conservation des probabilités) mais donnait également les structures fines correctes du spectre de l'atome d'hydrogène. Elle n'était malgré tout pas exempte de difficultés (états d'énergie négative ; paradoxe de Klein<sup>212</sup>). Cependant, Louis de Broglie qui avait très tôt eu l'intuition que la polarisation de la lumière correspondrait en terme corpusculaire à un doublement des états du photon vit très vite dans l'équation de Dirac une possibilité de représenter la particule de lumière, et commença à explorer en 1932 toutes les analogies formelles entre les ondes de Dirac et les ondes lumineuses. S'apercevant cependant que l'équation de Dirac était, telle quelle, appropriée à la description des électrons et non pas à celle du photon, Louis de Broglie eut l'idée en 1934 de représenter le photon par une paire de particules de Dirac, de charge nulle et de masse négligeable (il reprit à cette occasion l'hypothèse des neutrinos précédemment proposée par Pauli). Bien que cette théorie fût discutée avec beaucoup d'intérêt par de nombreux *leaders* de la physique théorique internationale (Pauli, Heisenberg, Jordan...), il est remarquable de noter que Louis de Broglie ne tente à aucun moment dans le cadre de sa théorie de proposer une façon de répondre au problème de quantités infinies (auquel elle doit également faire face). Car, encore une fois, la stratégie de Louis de Broglie est celle du long terme, celle de la refondation conceptuelle des théories, avec le pari pris que la résolution des problèmes les plus graves ne pourra intervenir qu'après avoir remis la théorie sur les bons rails. Et de fait, la « mécanique ondulatoire du photon » est, comme Louis de

---

<sup>209</sup> Voir plus haut.

<sup>210</sup> Dirac (1983), p. 140.

<sup>211</sup> De Broglie (1940), p. 89.

<sup>212</sup> Voir annexe 2.

Broglie l'admet lui-même, presque équivalente empiriquement à la théorie quantique du champ électromagnétique. Quelques différences existent cependant : le photon se voit pourvu d'une masse (à laquelle il faut fixer une limite très basse pour rester dans ce que l'expérience autorise) et de nouveaux états du photon (spin 0) apparaissent. Mais Louis de Broglie se concentre plus sur la question de savoir pourquoi ces différences de prédictions sont restées pour le moment inaperçues plutôt que sur la perspective d'une confirmation de sa théorie.

La « mécanique ondulatoire du photon » ouvre pour Louis de Broglie un programme de recherche dont le développement sera sa principale activité scientifique pendant une quinzaine d'année et qui débouchera sur une théorie générale des particules : la « théorie des particules à spin ». Il publiera entre 1934 et 1951 une vingtaine d'articles aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences* et quelques ouvrages associés à ce programme. Le fil directeur de la théorie des particules à spin<sup>213</sup> est de reprendre l'idée de la nature composite des particules dont le spin est différent de  $\frac{1}{2}$ . Les seules particules élémentaires sont alors décrites par l'équation de Dirac, et toutes les autres sont des combinaisons des particules de Dirac. Ce programme de recherche, qui mobilisera également le travail de certains élèves de Louis de Broglie, a pour principale ambition de fournir une vue unificatrice de la physique des particules tout en concurrençant le programme de recherche de la théorie quantique des champs, auquel Louis de Broglie faisait de multiples reproches<sup>214</sup>.

Cette description du savant, entièrement obnubilé par des questions fondamentales, éloigné de toute préoccupation concrète et expérimentale, doit cependant être nuancée. De fait, la liste des publications de Louis de Broglie atteste le fait qu'il est très ouvert et s'intéresse à des sujets assez variés. En effet, il publie épisodiquement durant ces années des articles qui sont très éloignés de ces questions fondamentales : citons par exemple un article sur la propagation des ondes dans des milieux anisotropes<sup>215</sup>, quelques articles sur la microscopie électronique<sup>216</sup> et un ouvrage sur les guides d'ondes<sup>217</sup>. Mais on peut s'apercevoir d'une part que ces questions restent liées à la physique des ondes et d'autre part que la place qui leur est réservée dans son œuvre reste modeste. Car s'il s'éloigne à d'autres occasions de ses sujets de prédilection, c'est également souvent afin de s'occuper d'autres questions fondamentales, comme le schéma probabiliste de la mécanique quantique ou la théorie du noyau.

### iii- Derniers efforts « orthodoxes » avant le grand tournant

On peut noter à la fin des années 1940 une dispersion de plus en plus forte de son attention. Louis de Broglie a alors développé dans une bonne mesure son programme de recherche sur la théorie des particules à spin, sans que celui-ci ait réellement débouché sur de nouvelles perspectives. Il se déclare lui-même satisfait de l'état de développement de sa théorie de la lumière, mais ne peut que constater qu'elle fait face aux mêmes problèmes que le programme concurrent de la théorie quantique des champs sans apporter aucune piste réellement convaincante. Conscient alors qu'aucun progrès véritable ne pourra apparaître en microphysique sans s'attaquer de front au lancinant problème des infinis, Louis de Broglie décide enfin de s'y atteler. On voit alors s'esquisser un début de ce qui sera le dernier programme de recherche de sa période « orthodoxe » : la théorie du champ soustractif. Celle-ci

---

<sup>213</sup> De Broglie (1943-A).

<sup>214</sup> Nous en discutons dans la partie c).

<sup>215</sup> De Broglie (1942).

<sup>216</sup> De Broglie (1946).

<sup>217</sup> De Broglie (1951-B).

a pour ambition de se débarrasser des infinis qui résultent des interactions en postulant l'existence d'un nouveau champ qui vient contrebalancer les quantités infinies. Elle fait partie de nombreuses pistes explorées par les physiciens théoriciens depuis l'apparition des infinis en théorie quantique des champs à la fin des années 1920. Pourtant, la résolution de ce problème sera apportée finalement par une voie très conservatrice qui ne proposera pas réellement de nouveaux éléments conceptuels mais qui sera basée sur une technique de calcul, la renormalisation, prenant en compte le fait que les charges et les masses qui sont mesurées expérimentalement ne correspondent pas aux charges et masses « nues » des particules mais sont modifiées par les phénomènes de polarisation du vide et de self-énergie. Parce qu'elle proposera des méthodes concrètes qui permettent de pousser jusqu'à la précision désirée les calculs de perturbations, la renormalisation s'imposera comme la méthode standard de résolution des problèmes en électrodynamique quantique, avant de se voir appliquer avec succès, quelques années plus tard, aux interactions nucléaires et de devenir un outil paradigmatique de la description des interactions fondamentales. Pourtant, dès sa parution, cette technique est jugée illégitime par un nombre assez grand de physiciens, parmi lesquels on ne retrouve pas les moins prestigieux. Dirac y émettra des réserves, considérant que cette procédure consistait à négliger une quantité infinie<sup>218</sup>. Feynman, qui reçut pourtant le prix Nobel de physique pour avoir appliqué avec succès cette technique à l'électrodynamique quantique, confiera lui-même dans sa conférence Nobel que cette technique consiste en réalité à cacher la poussière sous le tapis<sup>219</sup>. Il n'est alors pas étonnant, lorsqu'on connaît son souci pour les problèmes d'analyse conceptuelle des théories, de retrouver Louis de Broglie parmi les insatisfaits de la renormalisation, comme l'indique le fait qu'il continuera à travailler sur la théorie du champ soustractif jusqu'en 1952, c'est-à-dire jusqu'à son retour à la théorie de la double solution.

#### iv- Retour au programme causal

C'est dans cette période de flottement théorique que tous les éléments qui concourent au revirement de Louis de Broglie se mettent en place. Le fait de ne pas avoir un véritable projet scientifique (à l'exception de celui de la théorie du champ soustractif qui tarde cependant à remplir toutes ses promesses) lui permet effectivement de reprendre des réflexions restées en suspens pendant de nombreuses années. Nous l'avons dit, c'est pendant cette période que Louis de Broglie approfondit l'étude du schéma probabiliste de la mécanique quantique, reprenant ainsi à l'occasion les travaux de John Von Neumann, et notamment la distinction entre les cas purs et les mélanges<sup>220</sup>, et la question de l'impossibilité des variables cachées. Il consacre alors dans le tournant des années 1950 deux années de son cours à une révision et un approfondissement des problèmes d'interprétation probabiliste de la mécanique quantique, réexaminant au passage la théorie de la mesure de John Von Neumann, son théorème d'impossibilité des variables cachées, et les objections adressées par Einstein-Podolsky-Rosen d'une part et Schrödinger d'autre part à l'interprétation usuelle de la mécanique quantique<sup>221</sup>. Si le parti pris du cours reste orthodoxe (donnant même le sentiment que Louis de Broglie n'a jamais été aussi Bohrien que lors de sa rédaction), des modifications et des annotations écrites après coup

---

<sup>218</sup> Voir Kragh (1990), p. 184.

<sup>219</sup> Feynman (1965).

<sup>220</sup> Voir annexe 3.

<sup>221</sup> De Broglie (1982).

apparaissent sur le manuscrit de ce cours<sup>222</sup>. Elles se réfèrent aux doutes concernant la réelle portée du théorème de Von Neumann<sup>223</sup> ainsi qu'à un article reçu par Louis de Broglie au cours de l'été 1951, écrit par David Bohm, qui reprend et développe (indépendamment de Louis de Broglie) les idées de la théorie de l'onde pilote<sup>224</sup>.

Après une hésitation de quelques mois, et poussé en cela par l'activisme d'un jeune physicien, Jean-Pierre Vigier<sup>225</sup>, qui perçoit dans le développement de la théorie de la double solution un moyen de rapprocher la mécanique ondulatoire et la théorie de la relativité générale, Louis de Broglie prend la grave décision de revenir au programme de recherche qu'il avait initié plus de vingt-cinq ans plus tôt, et qui consiste à tenter de trouver une interprétation causale de la mécanique quantique. Là encore, cette attitude, qui peut paraître au premier abord surprenante, est tout à fait cohérente avec la stratégie adoptée par Louis de Broglie à de nombreuses reprises au cours de sa carrière. L'état de la physique théorique du moment semblant se trouver dans une impasse, il est plus judicieux, selon Louis de Broglie, de prendre un peu de recul sur les difficultés rencontrées (les infinis, les interactions nucléaires) afin de voir si une refonte totale des bases conceptuelles de la microphysique ne pourrait pas tout simplement permettre d'éviter ces apories :

« L'interprétation purement probabiliste de la Mécanique ondulatoire a certainement depuis un quart de siècle rendu des services aux physiciens parce qu'elle les a empêchés de s'enliser dans l'étude de problèmes très ardues et difficilement solubles comme ceux que pose la conception des doubles solutions et leur a ainsi permis de marcher résolument dans la voie des applications qui ont été nombreuses et fructueuses. Mais aujourd'hui le pouvoir explicatif de la Mécanique ondulatoire, telle qu'elle est enseignée, paraît en grande partie épuisé. Tout le monde le reconnaît et les partisans de l'interprétation probabiliste eux-mêmes cherchent, sans beaucoup de succès, semble-t-il, à introduire des conceptions nouvelles encore plus abstraites et plus éloignées des images classiques telles que matrices  $S$ , longueur minima, etc... Sans nier l'intérêt de ces tentatives, on peut se demander si ce n'est pas plutôt vers un retour à la clarté des représentations spatio-temporelles qu'il faudrait s'orienter<sup>226</sup> ».

Un tel jugement sur l'épuisement du pouvoir explicatif de la mécanique quantique peut laisser songeur lorsqu'on pense que ces mots sont écrits seulement quelques années après les énormes succès obtenus par les travaux de Feynman, Schwinger, Dyson et Tomonaga en électrodynamique quantique, mais c'est sans compter le fait que la physique nucléaire n'avait alors pas encore bénéficié des mêmes avancées et que de sérieux doutes se faisaient sentir quant à la possibilité de généraliser les mêmes méthodes. L'entreprise de Louis de Broglie est en outre beaucoup plus ambitieuse que celle de relever les défis posés par la microphysique : il s'agissait, bien entendu, de réorienter la physique théorique vers une représentation réaliste des phénomènes, mais, au-delà de cet objectif d'ordre philosophique, il s'agissait également de poser les bases d'une unification conceptuelle entre les deux grands domaines de la physique, la physique quantique et la relativité générale. Cette tentative de synthèse se base sur un résultat obtenu à la fin des années 1920 par Einstein et Grommer<sup>227</sup> dans le cadre de la relativité générale. Il consiste à montrer que les équations de champs de la relativité générale impliquent qu'une

---

<sup>222</sup> Voir le manuscrit du cours dans les Archives de l'Académie des sciences (42J/boîte 37). Ces annotations sont intégrées dans la version publiée en 1982.

<sup>223</sup> Voir l'annexe 3 sur le théorème de Von Neumann.

<sup>224</sup> Bohm (1952-A et B).

<sup>225</sup> Sur Vigier, voir Besson (2011).

<sup>226</sup> De Broglie (1952), p. 143.

<sup>227</sup> Einstein and Grommer (1927).

singularité du champ gravitationnel se propage en suivant les géodésiques de l'espace-temps, exactement comme le fait une particule dans le cadre de cette même théorie. L'ambition était alors de ramener toutes les lois de la physique (y compris les lois de mouvement des particules) à des équations de champs. Or, au début des années 1950, Jean-Pierre Vigié qui venait alors de s'installer à l'Institut Henri Poincaré et qui était spécialiste de la relativité générale, remarque une très forte analogie entre la démonstration de la formule de guidage de la singularité censée représenter la particule dans le cadre de la théorie de la double solution et la démonstration d'Einstein et Grommer. Dans les deux cas, le mouvement des corpuscules est entièrement déterminé par les équations du champ (le champ  $u$ , représentant l'onde associée à la particule dans le cadre de la double solution, et le champ gravitationnel dans le cadre de la relativité générale). Comme l'indiquera Louis de Broglie :

« Si, au prix d'un effort qui serait certainement long et difficile, on parvenait à étendre la Relativité généralisée de façon à faire rentrer les ondes  $u$  des diverses sortes de particules dans le cadre de l'espace-temps, on pourrait établir la forme des équations non linéaires satisfaites par les ondes  $u$ , étudier ce qui se passe dans les régions singulières et parvenir à comprendre la véritable nature des accidents spatio-temporels que sont les corpuscules et aussi la signification profonde du quantum d'action qui est certainement lié d'une façon essentielle à la structure à la fois granulaire et ondulatoire de la matière et du rayonnement. On obtiendrait ainsi (ce n'est pas encore pour demain !) une magnifique synthèse des conceptions de la Relativité généralisée et de la théorie des Quanta<sup>228</sup>. »

En somme, Louis de Broglie voulait renouveler pour la physique quantique et la Relativité générale ce qu'il avait entrepris jadis pour l'optique et la mécanique. Pourtant, une nouvelle fois, si nous concevons l'entreprise théorique comme fixée par le marché expérimental, on ne conçoit pas l'urgence, à cette période, de se proposer un objectif si ambitieux. La relativité générale ne pose alors, pour reprendre le vocabulaire de Kuhn, aucune anomalie urgente aux expérimentateurs, et les problèmes concrets que pourrait poser une inadéquation entre cette théorie et la physique quantique restent encore à cette période largement d'ordre conceptuel. Mais telle n'est pas, de toute évidence, la logique qui sous-tend les choix d'objets d'étude de Louis de Broglie.

Au contraire, on retrouve ici cette volonté d'unir des régions différentes de la physique, volonté qui se retrouve encore lorsque Louis de Broglie initiera, dans la continuité de ses travaux sur la double solution, son dernier grand programme de recherche : la thermodynamique cachée des particules. Cette théorie, initiée par David Bohm et Jean-Pierre Vigié en 1954 pour expliquer le fait que la fonction d'onde  $\psi$  détermine la probabilité de trouver la particule à chaque endroit de l'espace, consiste à introduire un milieu « subquantique » agissant comme un thermostat sur les particules de la microphysique. Du point de vue de la thermodynamique statistique, un tel thermostat a pour conséquence le fait que les particules subissent un mouvement brownien. Louis de Broglie, qui avait déjà, au cours des années 1940, remarqué quelques analogies entre le formalisme de la thermodynamique relativiste et celui de son ancienne théorie de l'horloge interne des particules, s'enthousiasma alors très vite pour un programme de recherche lui permettant d'entrevoir une description de la mécanique des particules microphysiques avec, cette fois-ci, le cadre conceptuel de la thermodynamique statistique<sup>229</sup>, modèle par excellence d'une théorie causale et compatible avec le réalisme scientifique.

---

<sup>228</sup> De Broglie (1954), p. 162.

<sup>229</sup> De Broglie (1963).

En conclusion, cette mise en perspective du parcours de Louis de Broglie à travers les choix de ses objets d'études montre, me semble-t-il, que nous pouvons en comprendre chaque étape si nous admettons que ces choix sont avant tout structurés par 1) une priorité à accorder aux problèmes de cohérence conceptuelle des théories, avec le raisonnement sous-jacent qu'il faut mieux prendre le temps de replacer un problème au sein d'une nouvelle grille de lecture plutôt que de l'affronter de face avec les mauvais outils, et 2) une volonté, largement encouragée par un premier succès, de fournir une description unifiée du monde physique à travers des tentatives de synthèse de différents pans de la discipline.

## b) Le style de recherche de Louis de Broglie

Après avoir analysé en détail, à travers une étude du parcours de Louis de Broglie, la stratégie théorique de celui-ci dans le choix de ses sujets de recherche, nous chercherons à déterminer à présent ce qui caractérise la production scientifique de Louis de Broglie. Nous essaierons notamment de dégager, à travers une étude plus approfondie de ses travaux, par quels procédés heuristiques se forment chez lui les théories, et ce qui justifie réellement le choix d'un formalisme au détriment d'un autre. Nous serons par la même occasion en mesure de compléter, et si besoin de préciser ou modifier quelques éléments que nous avons dégagés de l'étude entreprise plus haut des textes épistémologiques de cet auteur.

Avant de rentrer dans le vif du sujet, je propose de présenter quelques grilles d'analyses qui ont été proposées par différents auteurs afin de rendre compte des différences de style chez les physiciens théoriciens. Bien que ces classifications se recoupent quelques fois, elles introduisent des nuances importantes. Enfin, si j'essaierai de les présenter tout d'abord d'une manière qui reste fidèle aux auteurs à qui je les ai empruntées, je n'hésiterai pas à introduire des compléments de descriptions si nécessaires.

### i) Théoriciens formalistes et théoriciens structuraux.

Jean Ullmo a présenté dans *La pensée scientifique moderne*<sup>230</sup> une classification des théories s'inspirant de la classification de Meyerson dans *la déduction relativiste*<sup>231</sup> qui distingue les théories à principe et les théories à images. Ullmo tente de généraliser cette grille de lecture en distinguant ce qu'il nomme les théories structurelles et les théories formelles. Les premières comprennent les théories à images, mais ne s'y limitent pas. En effet, si les théories à images (nous pouvons donner comme exemple la théorie de l'atome de Bohr qui représente l'atome comme un système solaire en miniature, la théorie cinétique des gaz, qui permet de visualiser ceux-ci comme composés de milliards de petites billes s'entrechoquant sans cesse...) ont connu de nombreux succès et ont largement contribué à faire progresser les sciences, ça ne tient pas tant à ce qu'elles permettent à l'intuition spatiale de s'exercer à plein régime qu'à ce qu'elles engagent des structures. Une structure est, selon Jean Ullmo « un ensemble de rapports considérés comme caractéristiques entre éléments dont l'identité et même la nature est jusqu'à un certain point, indifférente, et qui peuvent, par suite, être changés, remplacés par d'autres éléments analogues ou différents, sans que la structure soit altérée<sup>232</sup> ». Or, si les exemples les

---

<sup>230</sup> Ullmo (1969).

<sup>231</sup> Meyerson (1925).

<sup>232</sup> Ullmo (1969), pp. 99-100.



plus intuitifs de systèmes différents ayant des structures semblables sont données par les rapports de type spatial (par exemple la structure commune au modèle de Bohr-Rutherford de l'atome et à celui d'un système planétaire réside dans les rapports spatiaux communs entre les électrons et le noyau d'une part et l'étoile et les planètes d'autre part), ceux-ci n'épuisent cependant pas la notion de structure (pour illustrer ce fait, Ullmo propose à la suite de Bertrand Russell de considérer ce qui lie une sonate et son enregistrement sur disque à une structure commune, qui ne peut pas se formuler dans ce cas comme une similarité dans des rapports spatiaux). Dans les théories structurales, des objets scientifiques sont introduits pour expliquer des lois scientifiques : l'exemple des molécules de la théorie cinétique des gaz, introduites pour expliquer les lois de la thermodynamique, ou encore celui des lignes de forces, introduites par Faraday pour expliquer les lois de l'électricité et du magnétisme, peuvent être mobilisés. Le rôle des structures dans les sciences est alors de représenter ces objets scientifiques nés des lois :

« Grâce aux structures, les objets sortent des lois qui les ont désignés. On élabore une structure pour rendre compte des lois connues ; mais la structure est plus riche que ces lois, et à ce titre, elle constitue une hypothèse, parce qu'elle est toute prête à être engagée dans de nouveaux types d'interactions<sup>233</sup> »

Voilà pourquoi, selon Ullmo, les théories structurales, à condition de ne pas les restreindre à des modélisations naïves illustrant certaines lois connues de la physique (par exemple les modèles mécaniques développés par les Britanniques à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle pour représenter les phénomènes électriques et magnétiques) sont les moteurs les plus puissants de l'avancement de l'activité scientifique.

Contrairement aux théories structurales, les théories formelles évitent de postuler l'existence d'objets scientifiques non directement observables dans le but de donner une explication aux lois de la physique. L'objectif d'une théorie est d'ailleurs uniquement de proposer des lois qui rendent compte des phénomènes expérimentaux. Plus précisément, Ullmo les caractérise de la manière suivante :

« Dans les [théories formelles] ne figurent que des grandeurs globales, telles que l'énergie, l'entropie, l'action, le potentiel, qui ne visent qu'à la formulation de lois, et se référant simplement à l'expérience macroscopique. De telles théories peuvent être appliquées à de nouveaux domaines par une extension purement formelle, en généralisant à ce domaine les définitions des grandeurs mesurables qui y figurent, et parfois en renonçant à certains principes qui les fondent pour accroître leur extension<sup>234</sup> ».

Le prototype de ces théories est la thermodynamique classique, mais nous pouvons également citer la mécanique des matrices d'Heisenberg qui résulte d'un jeu « d'extension formelle » de la mécanique classique, « en généralisant » à la microphysique « les définitions des grandeurs mesurables qui y figurent et en renonçant » au principe de commutation des grandeurs « pour accroître leur extension ».

## ii) Théoricien à principes et théoricien à problèmes

---

<sup>233</sup> *Ibid.* p. 103.

<sup>234</sup> *Ibid.* p. 115.



Cette catégorisation a été proposée par Suman Seth dans son ouvrage sur Arnold Sommerfeld : *Crafting the quantum*<sup>235</sup>. Dans cet ouvrage, Suman Seth propose de caractériser ce qui fonde l'approche théorique d'Arnold Sommerfeld par contraste avec quelques-uns de ses illustres compatriotes, comme Max Planck ou Albert Einstein. Arnold Sommerfeld est désigné comme un théoricien à problème alors que les deux derniers seraient des théoriciens à principe. Cette distinction repose essentiellement sur trois critères :

-Un critère méthodologique : alors que les physiciens à problèmes recherchent - comme le laisse suggérer leur titre - avant tout à résoudre certains problèmes spécifiques, en mobilisant une utilisation pragmatique de l'étendue de leurs outils théoriques, les théoriciens à principes cherchent quant à eux à dégager les principes généraux de la physique en portant un regard distant sur les problèmes spécifiques. Alors que les premiers seront avant tout intéressés par la prédiction quantitative ou qualitative d'un résultat, les seconds seront quant à eux préoccupés par l'obtention d'un tableau d'ensemble qui leur permettra de classer de manière cohérente les lois empiriques de la physique, voire de les comprendre.

-Un critère ontologique : la physique théorique à principes, telle qu'elle a été pratiquée par Einstein et Planck, peut être vue comme une tentative de fonder la physique « sur des principes qui transcendent toute base substantielle particulière<sup>236</sup> ». Par exemple, la théorie de la relativité restreinte peut être considérée comme le prototype d'une réalisation d'un théoricien à principes, dans le sens où elle est fondée sur un petit nombre de postulats (invariance des lois de la physique par changement de référentiel, invariance de la vitesse de la lumière et principe de causalité) qui permettent d'obtenir des lois indépendamment de la nature des entités physiques que l'on considère, à l'inverse des théories qui concurrençaient la théorie de la relativité restreinte à ses débuts et qui étaient basées sur des conceptions particulières de l'éther et/ou sur une vision électromagnétique du monde. Seth fait remarquer que Sommerfeld était très attaché au dernier programme.

-Enfin un critère pédagogique : arguant du fait que Sommerfeld réussit à former un nombre impressionnant d'élèves qui eurent par la suite d'énormes succès tout au long de leur carrière, contrairement à Einstein ou à Planck.

Bien qu'à ce stade, Seth ne donne pas d'explication précise de la manière dont s'articulent ces trois critères, ce qui pourrait laisser penser que leurs conjonctions s'appliquent uniquement aux quelques cas particuliers qu'elle discute, on peut imaginer la tentative d'explication suivante : le théoricien à principes est avant tout à la recherche d'une théorie physique axiomatisée. Cela implique : 1) qu'il sera concentré sur l'obtention de tels axiomes et non pas sur leurs applications particulières (critère méthodologique), 2) que les énoncés des théories physiques prendront, de par leur caractère axiomatique, d'avantage l'allure d'énoncés mathématiques formels que d'énoncés de spécification de la nature des objets physiques que la théorie étudie (critère ontologique), 3) que l'œuvre de la physique possède une unicité, qu'on ne construit qu'une seule fois les lois fondamentales de la physique et que, si on peut apprendre à un étudiant des méthodes standards de résolutions de problèmes, on ne peut pas lui apprendre de manière univoque à dégager les principes de la physique par une méthode particulière (critère pédagogique). Comme le remarquait Albert Einstein lui-même :

« Car ici [c'est-à-dire dans la tâche d'établir des principes] il n'existe pas **de méthode** qu'on puisse **apprendre** ou systématiquement appliquer pour atteindre un objectif. Le chercheur doit plutôt

---

<sup>235</sup> Seth (2010).

<sup>236</sup> *Ibid.* p. 3.

épier si l'on peut dire, dans la nature, ces principes généraux, pendant qu'il dégage à travers les grands ensembles de faits expérimentaux des traits généraux et certains, qui peuvent être explicités nettement<sup>237</sup>».

### iii) Physicien mathématicien et physicien théoricien

La classification proposée par Pestre englobait en réalité plusieurs des catégories que nous avons proposées. Nous choisissons ici de reprendre cependant cette catégorie mais en lui donnant le sens restreint présenté ci-dessous.

Le physicien mathématicien est avant tout soucieux de parfaire l'outil mathématique. Il s'intéressera à un problème physique spécifique dans la mesure où celui-ci est représentatif d'une classe de problèmes pour lesquels une méthode de résolution mathématique est particulièrement bien adaptée. Il sera soucieux de la cohérence du formalisme mathématique de la théorie et ne sera donc pas à l'aise avec les théories qui reposent sur des bases incertaines (comme l'ancienne théorie des quanta). En conséquence de quoi, son principal souci n'est pas forcément d'introduire de nouvelles hypothèses physiques, mais plutôt de parfaire le formalisme mathématique et les outils de résolution de problèmes.

Il s'oppose au physicien théoricien dont le principal souci est de résoudre les problèmes physiques et dont la démarche est caractérisée par le fait de ne pas hésiter à lancer de nouvelles idées, quand bien même celles-ci ne seraient provisoirement pas intégrées à un formalisme théorique rigoureux.

### iv) Discussion

Une lecture superficielle de ces différentes classifications pourrait laisser penser qu'elles se recoupent dans de grandes proportions et qu'on pourrait finalement adopter une simple grille d'analyse binaire selon le schéma suivant : formalistes = théoriciens à principes = physiciens mathématiciens *contre* théoriciens structuraux = théoriciens à problèmes = physiciens théoriciens. Il me semble cependant qu'il n'en est rien, et le cas de Louis de Broglie le montrera largement.

On peut d'ores et déjà le montrer par exemple dans le cas d'Albert Einstein, qui peut facilement être décrit comme étant un physicien à principes, mais dont l'attribution de l'adjectif « formaliste » peut uniquement se faire dans un sens restreint du terme et qui ne peut enfin pas être vu comme un physicien mathématicien tel que nous venons de le définir. Il s'opposa par exemple au caractère purement formel et complètement dénué d'intuitivité physique de la mécanique quantique et n'hésita pas à introduire des hypothèses difficilement compatibles avec l'attitude d'un pur physicien mathématicien tel que décrit précédemment (les quanta de lumière, par exemple). Dirac, au contraire, pourrait être décrit plus facilement par le terme de « physicien formaliste » (en montrant au passage que cette catégorie n'est pas incompatible avec la créativité et l'intuition) que par celui de « physicien à principes » : ses théories (qu'on pense à sa théorie des q-nombres, sa théorie de la seconde quantification et son équation d'onde) reposent effectivement d'avantage sur une manipulation presque ludique<sup>238</sup> des symboles mathématiques que sur un énoncé clair de principes physiques. Pour

<sup>237</sup> Einstein (1979), p. 126. Les mots en gras sont soulignés par moi.

<sup>238</sup> Par exemple, à propos de la genèse de l'idée de seconde quantification, Dirac confiera à Thomas Kuhn : « I remember the origin of that work was just playing about with equations. I was intending to get a theory of radiation at the time. I was just playing about the Schrodinger equation. I got the idea of playing the quantization to it and worked out what it gave and found out it just gave Bose statistics ». Dirac (1962).

caricaturer la différence entre ces deux genres de physiciens, on pourrait discuter la façon dont ils conçoivent le principe de relativité restreinte. Pour Einstein, ce principe est d'abord un principe physique (il n'existe pas de repère inertiel privilégié, chaque repère inertiel est équivalent en droit pour la description des phénomènes physiques) qui se traduit, en second lieu, mathématiquement (invariance des lois de la physique par changement de repère inertiel). Pour Dirac, l'essence même de la théorie de la relativité se retrouve dans les propriétés de covariance des symboles mathématiques du formalisme théorique<sup>239</sup>. L'audace de Dirac pourrait de même difficilement le faire ranger dans la catégorie des physiciens mathématiciens, tels que décrits plus haut. Son principal talent n'est en effet pas de parfaire la rigueur d'un formalisme mathématique afin de le mettre sous une forme impeccable, mais plutôt de jouer avec en n'hésitant pas à le distordre pour le généraliser, afin de libérer toutes ses potentialités, même lorsque celles-ci débordent sur des conséquences physiques très étonnantes, voire choquantes. Son travail suscita des commentaires qui s'appliqueraient difficilement à la froide rigueur d'un physicien mathématicien. Ainsi Pauli affirmait, après avoir constaté la mise en évidence expérimentale du positron prédit par la théorie des trous de Dirac que « success seems to have been on the side of Dirac rather than logic »<sup>240</sup>.

Les différences entre théoriciens structuraux (notamment les théoriciens à images), théoriciens à problèmes et physiciens théoriciens me paraissent encore plus évidentes. On l'a vu, les théoriciens à images ne sont que des cas particuliers des théoriciens structuraux, pour lesquels l'intuition spatiale joue à plein régime. Le théoricien à images se caractérise avant tout par la volonté de se représenter visuellement les phénomènes physiques, ce qui ne prédispose en rien d'une volonté à privilégier la résolution de problèmes spécifiques plutôt que l'établissement de théories générales. Les exemples de Dirac et d'Einstein que nous avons évoqués plus haut montrent qu'un physicien théoricien peut aussi bien être un physicien formaliste qu'un physicien à principes.

### **L'heuristique de Louis de Broglie**

Dans un texte consacré au style de recherche de Louis de Broglie, Michel Paty a, me semble-t-il, résumé d'une façon remarquablement pertinente les procédés heuristiques que mobilise Louis de Broglie dans ses constructions théoriques :

« Il semble que, dans l'hypothèse de Louis de Broglie [de la dualité onde-corpuscule], il y ait une part qui relève du modèle : l'électron dans son onde – et les paramètres sont ajustés en fonction de la cohérence du modèle, de son comportement relativiste, aboutissant aux relations que l'on sait. Ce modèle théorique de la généralisation de la dualité onde-corpuscule aux éléments de matière est l'œuvre d'un physicien théoricien un peu phénoménologue, dans une tradition dont Langevin était un illustre - et en France, rare - exemple.

Mais il y a, me semble-t-il, un autre aspect, plus formaliste, dans la démarche de ces premiers travaux de Louis de Broglie. Nous le décelons dans la part que doit son hypothèse à la forme des équations d'Hamilton-Jacobi, suggérant une analogie entre le mouvement des particules et l'optique géométrique [...]. De la similitude de forme mathématique, de Broglie infère une identité de phénomènes et d'objets. À cet égard, il est peut-être aussi l'héritier de cette autre tradition, alors plus

<sup>239</sup> Pour nuancer la distinction entre Dirac et Einstein, il faut reconnaître que ce dernier utilisera une démarche plus « formaliste » au moins lors de la seconde phase de son élaboration de la relativité générale (l'introduction du formalisme tensoriel) ; la première phase, caractérisée par l'introduction du principe de correspondance, reste quant à elle bien marquée du sceau de la théorie à principes.

<sup>240</sup> Voir par exemple Pais (1986), p. 361.

vivace dans le contexte scientifique français, des physico-mathématiciens : c'est la forme mathématique du problème qui guide le raisonnement<sup>241</sup> ».

Cette description, bien qu'entreprise avec un vocabulaire un peu différent de celui que nous avons fixé, recouvre parfaitement ce dont nous avons parlé lorsque nous définissions les termes de physicien structural et de physicien formaliste<sup>242</sup>. Ce que je voudrais mettre en évidence dans les lignes qui suivent est que la mobilisation alternative de ces deux tendances dans la construction progressive des théories est la plus spécifique marque de fabrique de la constitution de la théorie de Broglie. Je le ferai à travers l'étude de la création de la théorie de la dualité onde-corpuscule et celle de la mécanique ondulatoire du photon.

### **Va et vient de l'image physique et du formalisme**

#### **i- Premier exemple : de la dualité onde-corpuscule à la théorie de la double solution**

J'ai décrit plus haut les bases de la théorie de la dualité onde-corpuscule que Louis de Broglie pose au cours des années 1923-1924. Comme le souligne très bien Michel Paty à propos de l'obscurité du lien entre la vitesse de groupe et la vitesse du corpuscule dans les premières intuitions de Louis de Broglie<sup>243</sup>, les images qui concourent à la formation de la théorie sont loin de former une description d'un phénomène physique parfaitement cohérent. La première image physique qu'on évoque, et qui a sans doute eu un rôle effectif dans le processus de création du physicien, est celui de l'onde stationnaire contrainte de se propager dans un milieu fermé qui définit ses différentes fréquences propres et introduit ainsi l'idée de quantification. Mais il est remarquable de constater que la mobilisation de cette onde vient uniquement dans un second temps de la démonstration. En réalité, la première image effectivement utilisée par Louis de Broglie est celle d'un phénomène périodique interne à un corpuscule. À ce stade, des arguments purement formels indépendants de toute visualisation du phénomène physique apparaissent : d'un côté, la formule  $E=mc^2$  qui symbolise l'énergie interne du corpuscule d'après la théorie de la relativité, de l'autre la formule  $E=h\nu$  qui symbolise l'énergie quantique liée à un phénomène périodique d'après la théorie de Planck. Ces deux formules devant être intimement liées, de Broglie en tire la relation fondamentale  $mc^2 = h\nu$ . Mais il s'est ainsi placé dans le formalisme de la relativité restreinte, dont il doit tirer toutes les conséquences possibles : la fréquence du phénomène périodique interne doit décroître avec la vitesse, comme le stipule la loi de dilatation temporelle relativiste. Or, l'énergie de la particule doit, quant à elle, croître conformément à l'augmentation de l'énergie en fonction de la vitesse. À ce stade, il convient donc de définir une seconde fréquence, qui, elle, augmenterait en fonction de la vitesse. Et la fréquence d'une onde a précisément cette propriété. L'image d'une onde en accord de phase avec le phénomène interne du corpuscule peut prendre forme<sup>244</sup>, image que Louis de Broglie n'hésite d'ailleurs pas à décrire aux lecteurs dans sa thèse de doctorat :

---

<sup>241</sup> Paty (1988), pp. 164-165.

<sup>242</sup> Paty parle ici de physico-mathématique, mais le sens donné ici à ce terme correspond à mon sens davantage à ce que nous avons nommé ici « formalisme » que « physique mathématique ».

<sup>243</sup> « En fait, la représentation qui fait image, de la particule dans son onde de vibration avec laquelle elle est constamment en phase, est plus complexe qu'il n'y paraît. Les hypothèses adoptées comportent peut-être plus d'ambiguïté qu'il n'en est montré (notamment sur la vitesse de phase et la vitesse de groupe) » (Paty (1988), p. 165).

<sup>244</sup> Voir schéma plus haut.

« Pour bien préciser ce dernier point, nous allons exposer une comparaison mécanique un peu grossière, mais que parle à l'imagination. Supposons un plateau circulaire de très grand rayon, à ce plateau, sont suspendus des systèmes identiques formés d'un ressort spiral auquel est accroché un poids. Le nombre des systèmes ainsi suspendus par unité de surface du plateau, leur densité, va en diminuant rapidement quand on s'éloigne du centre du plateau de telle sorte qu'il y a condensation des systèmes autour du centre. Tous les systèmes ressorts-poids étant identiques ont tous la même période ; faisons les osciller avec la même amplitude et la même phase. La surface passant par les centres de gravité de tous les poids sera un plan qui montera et qui descendra d'un mouvement alternatif. L'ensemble ainsi obtenu présente une très grossière analogie avec le morceau isolé d'énergie tel que nous le concevons.

La description que nous venons de faire convient à un observateur lié au plateau. Si un observateur voit le plateau se déplacer d'un mouvement de translation uniforme avec la vitesse  $\beta c$ , chaque poids lui paraîtra une petite horloge subissant le ralentissement d'Einstein ; de plus, le plateau et la distribution des systèmes oscillants ne seront isotropes autour du centre en raison de la contraction de Lorentz. Mais le fait fondamental pour nous, c'est le déphasage des mouvements des différents poids [...]. Si à un moment donné de son temps, notre observateur fixe considère le lieu géométrique des centres de gravité des divers poids, il obtient une surface cylindrique dans le sens horizontal dont les sections verticales parallèles à la vitesse du plateau sont des sinusoides. Elle correspond dans notre cas particulier envisagé à notre onde de phase. [...] <sup>245</sup> ».

L'image reprend ici de l'avance sur le formalisme, car aucun élément de celui-ci ne permet de traduire « la condensation des systèmes autour du centre ». La cinématique de la particule est, en revanche, bien définie dans le cas du mouvement uniforme. Reste à la généraliser et à établir une nouvelle dynamique. Pour ce faire, Louis de Broglie, une nouvelle fois, recourt à une démarche purement formaliste. Ayant démontré que le vecteur d'univers énergie-quantité de mouvement de la particule entretient un lien de proportionnalité avec le vecteur d'onde d'univers, l'identification du principe de moindre action pour la particule à celui de Fermat pour l'onde permet de fixer l'allure des rayons de l'onde – identifiés aux trajectoires des particules dans le cas de la présence d'un potentiel.

On sait que Louis de Broglie laissa le soin à Schrödinger de généraliser la nouvelle dynamique dans les cas où l'approximation de l'optique géométrique ne peut plus avoir lieu. En réalité, Louis de Broglie tenta lui-même d'écrire une équation d'onde dès 1925. Mais il se laissa cette fois-ci d'avantage guider par son intuition physique que par le formalisme. Ce fait est assez frappant lorsque l'on compare une des dérivations de l'équation de Schrödinger - qui semble très naturelle si on se place dans le cadre du formalisme d'Hamilton-Jacobi - avec celle qui mène Louis de Broglie à écrire son équation d'onde inadéquate.

L'équation d'Hamilton-Jacobi pour une particule dans un champ  $U$  s'écrit :

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{(\nabla S)^2}{2m} + U$$

Elle permet de déduire l'évolution des surfaces d'égale action ( $S$ ) dans le temps. Dans le cas d'un champ  $U$  conservatif, on peut introduire une action réduite  $S_0$  de sorte que  $S = -Et + S_0$ , où  $E$  est l'énergie constante de la particule. On montre finalement que les surfaces d'égales actions se propagent à une vitesse  $V = \frac{E}{\sqrt{2(E-V)}}$ . Il suffit alors d'identifier, comme le fait Louis de Broglie dans sa thèse, l'action de la particule avec la phase de l'onde  $\phi$ , suivant la relation  $S = \frac{\phi}{h}$ , pour interpréter l'équation d'Hamilton-Jacobi comme donnant les surfaces d'égales phases de l'onde de Louis de

---

<sup>245</sup>De Broglie (1924), pp. 36-37.

Broglie à l'approximation non-relativiste. Or, en supposant qu'une telle onde obéit à l'équation d'onde standard — celle de d'Alembert qui, pour une onde de fréquence fixée  $\omega$ , s'écrit

$$\frac{\omega^2}{V^2}\psi + \Delta\psi = 0$$

— on obtient alors, après substitution de  $V = \frac{E}{\sqrt{2(E-V)}}$  et de  $E = \hbar\omega$ , l'équation de Schrödinger indépendante du temps :

$$-\frac{\hbar^2\Delta\psi}{2m} + U\psi = E\psi$$

Bien entendu, ce jeu formel laisse totalement de côté l'interprétation de l'onde et la question de savoir comment le corpuscule s'intègre à celle-ci.

Par contre, Louis de Broglie s'est fixé au cours de sa thèse et dans les mois qui suivent sa soutenance une idée physique plus précise de la nature et de la forme de son onde. Comme on l'a vu plus haut dans la citation, Louis de Broglie avait l'intuition que l'aspect corpusculaire de la matière devait correspondre à une sorte de phénomène de condensation au sein de l'onde, qu'il pensait par ailleurs être de nature électromagnétique. Ces deux suppositions fixent l'équation d'onde et les solutions de son formalisme :

-La nature électromagnétique de cette onde a pour conséquence qu'elle ne peut que se propager (dans le vide) suivant l'équation :

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \Delta u = 0$$

-Les solutions d'une telle onde doivent cependant intégrer la nature corpusculaire de la particule et le fait qu'elle se propage à la vitesse  $\beta c$ . Louis de Broglie adapte alors la solution à l'image qu'il se fait du corpuscule : un point au niveau duquel l'amplitude de l'onde tend vers l'infini. Le corpuscule est alors présenté dans le formalisme comme le point source d'un champ à symétrie sphérique, qui peut, remarque de Broglie, se décomposer en une solution d'onde retardée (une onde qui se propage à la vitesse  $c$  du point matériel vers l'extérieur) et une solution d'onde avancée (une onde qui se propage à la vitesse  $c$  de l'extérieur pour converger vers le point matériel)<sup>246</sup> :

$$u(r_0, t_0) = \frac{A}{2r_0} [\cos\left(2\pi\nu_0\left(t_0 - \frac{r_0}{c}\right) + c1\right) - \cos\left(2\pi\nu_0\left(t_0 + \frac{r_0}{c}\right) + c2\right)]$$

Où  $r_0$  désigne la distance au point matériel.

Louis de Broglie abandonnera cette tentative dès qu'il prendra connaissance de la théorie de Schrödinger. Pourtant, on peut y voir les germes de sa théorie de la double solution. Celle-ci a pour objectif d'interpréter la solution d'onde régulière  $\psi$  de Schrödinger (ne laissant à première vue pas de place à une conception granulaire de la matière) dans le cadre de ses propres conceptions. La solution régulière, qui permet de calculer correctement les niveaux d'énergie des électrons au sein de l'atome, doit alors représenter une vision statistique des phénomènes qu'il faut compléter en incorporant l'onde  $u$ , représentant l'unicité du phénomène physique. Celle-ci n'obéit certes plus à la même équation que

---

<sup>246</sup> De Broglie (1925).



précédemment<sup>247</sup>, mais est construite dans la même perspective : s'adapter à la conception du corpuscule comme singularité d'un champ.

Finalement, on peut voir à travers cet exemple d'une lente construction théorique poussée jusqu'à son terme une oscillation entre plusieurs attitudes : théoricien à l'image au moment d'initier sa théorie, Louis de Broglie devient formaliste pour poser les bases de celle-ci. Or, ces développements formels l'emmènent bien au-delà de ses premières intuitions. Disposant de toutes les données du problème, Louis de Broglie tente alors d'adapter le formalisme pour *in fine* le faire coller sur mesure à son intuition physique imagée.

## ii- Deuxième exemple : la mécanique ondulatoire du photon

Le second exemple que nous choisirons est d'autant plus intéressant qu'il se réfère à un travail écrit pendant la phase « orthodoxe » de Louis de Broglie, dans laquelle il était privé d'une partie de son ressort « réaliste » et avait donc parfaitement conscience de ce qu'il pouvait y avoir de trompeur dans les images suscitées par les théories physiques.

Comme nous l'avons dit, Louis de Broglie s'étonne, à la fin des années 1920, que l'établissement de la mécanique ondulatoire sur des bases solides ne permet pas d'établir une théorie ondulatoire du photon qui soit équivalente aux théories de Schrödinger ou de Dirac pour l'électron. En réalité, les bases d'une théorie quantique satisfaisante de la lumière (l'électrodynamique quantique) sont à cette période déjà en place grâce notamment aux travaux de Jordan, Dirac, Heisenberg, Pauli, Fermi et quelques autres, mais ceux-ci ont la spécificité de sortir du cadre de la mécanique ondulatoire et de s'inscrire dans celui de la théorie quantique des champs. Cette dernière théorie pousse la logique de la démarche formaliste jusqu'à son terme, puisque son essence peut être décrit, en simplifiant<sup>248</sup>, comme une application aveugle des prescriptions formelles de la mécanique quantique à une théorie Hamiltonienne de champs : attribution du statut d'opérateur hermitien aux variables dynamiques du système (les variables de champ) et imposition des conditions de non-commutation aux couples de grandeurs canoniquement conjuguées. Louis de Broglie privilégie quant à lui<sup>249</sup> la version ondulatoire de la mécanique quantique, qui semble cependant beaucoup plus difficilement généralisable dans le domaine relativiste. C'est toutefois avec cette idée physique d'attribuer au photon une onde traduisant adéquatement ses propriétés que démarre son programme de recherche. Cependant, le formalisme mathématique tensoriel des théories sur lesquelles il va s'appuyer (la théorie de l'électron de Dirac et l'électrodynamique classique) vont dans un premier temps jouer un rôle majeur. L'équation de Dirac peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \alpha_1 \psi + \frac{\partial}{\partial y} \alpha_2 \psi + \frac{\partial}{\partial z} \alpha_3 \psi + \kappa \mu_0 c \alpha_4 \psi \quad (1)$$

Elle fait apparaître des quantités avec lesquelles on peut former les composantes d'un tenseur antisymétrique « moment électrique ( $\pi$ ) - moment magnétique ( $\mu$ ) » dont les propriétés sont

<sup>247</sup> Elle obéit à l'équation de Schrödinger à l'approximation non-relativiste, et à l'équation de Klein-Gordon dans le cas relativiste.

<sup>248</sup> Les théories comme l'électrodynamique quantique nécessitent cependant certains ajustements par rapport à leur formulation canonique classique, en raison de la redondance des variables de champs.

<sup>249</sup> Pour des raisons que nous examinerons plus tard.



analogues au tenseur antisymétrique du champ électromagnétique dont les composantes sont  $(E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z)$  :

$$\mu_x = \psi^* i \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \psi ; \mu_y = \psi^* i \alpha_3 \alpha_1 \alpha_4 \psi ; \mu_z = \psi^* i \alpha_1 \alpha_2 \alpha_4 \psi$$

$$\pi_x = \psi^* i \alpha_1 \alpha_4 \psi ; \pi_y = \psi^* i \alpha_2 \alpha_4 \psi ; \pi_z = \psi^* i \alpha_3 \alpha_4 \psi$$

Outre, cette analogie formelle entre l'onde de Dirac et l'onde électromagnétique<sup>250</sup>, Louis de Broglie s'aperçoit que lorsque la vitesse de l'électron tend vers celle de la lumière, les deux vecteurs  $\vec{\pi}$  et  $\vec{\mu}$  sont perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde, à l'instar des champs  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$ . De Broglie pose alors l'hypothèse selon laquelle le photon doit être représenté par une onde  $\psi$  de Dirac, et ose la conjecture suivante :

« Toute onde  $\psi$  peut être représentée par une superposition d'ondes planes monochromatiques et les expressions [ci-dessus] des champs se décomposent en termes provenant de la combinaison de deux composantes monochromatiques. L'onde électromagnétique lumineuse classique de fréquence  $\nu$  s'obtient par la combinaison de deux ondes  $\psi$  planes et monochromatiques, de même direction et de fréquence  $\nu_m$  et  $\nu_n$  telles que  $\nu = \nu_m - \nu_n$ . La fréquence d'une onde lumineuse serait donc reliée aux énergies de deux états stables du photon par la loi des fréquences de Bohr. Ainsi, dans notre manière de voir, le rapport entre les ondes  $\psi$  du photon et les champs de l'onde électromagnétique associée serait le même que celui qui existe en Mécanique ondulatoire entre les ondes  $\psi$  de l'électron et les éléments de matrice d'Heisenberg et de Schrödinger<sup>251</sup> »

Cependant, Louis de Broglie se rend très vite compte que cette hypothèse suggérée par l'analogie formelle entre onde électromagnétique et onde de Dirac n'est pas viable physiquement. En janvier 1934, de Broglie la précise et la modifie quelque peu, et son côté constructiviste reprend ses droits. Il remarque en effet que la fonction essentielle d'un champ électromagnétique est de produire des effets sur la matière chargée. D'un point de vue quantique, tout processus électromagnétique élémentaire correspond à l'absorption ou à l'émission d'un photon. Les champs électriques et magnétiques doivent donc eux-mêmes être liés à de tels processus. Si donc, comme il est naturel en mécanique ondulatoire, les éléments de matrices sont liés à la transition entre deux états (l'état initial  $\psi$  et l'état final  $\varphi^*$ ), l'annihilation d'un photon doit correspondre à la transition d'une particule de Dirac d'un état initial d'énergie positive à un état final d'énergie négative. Les champs électromagnétiques associés au photon seraient donc liés aux éléments de matrices de transition entre une solution monochromatique à énergie positive  $\psi$  et la solution à énergie négative qui lui correspond (et que de Broglie nomme la solution complémentaire)  $\psi^- = -i \alpha_2 \alpha_4 (\psi)^*$ . En posant  $\varphi = (\psi^-)^*$ , les champs électromagnétiques deviennent donc (à une constante près) :

$$H_x = \varphi i \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \psi ; H_y = \varphi i \alpha_3 \alpha_1 \alpha_4 \psi ; H_z = \varphi i \alpha_1 \alpha_2 \alpha_4 \psi$$

$$E_x = \varphi i \alpha_1 \alpha_4 \psi ; E_y = \varphi i \alpha_2 \alpha_4 \psi ; E_z = \varphi i \alpha_3 \alpha_4 \psi$$

Mais pour que de telles transitions soient possibles, il faudrait que le corpuscule de Dirac soit accompagné d'un « trou » :

<sup>250</sup> De Broglie (1932-A).

<sup>251</sup> De Broglie (1932-B).

« En d'autres termes, le photon ne serait pas un corpuscule simple : il serait formé d'un corpuscule de lumière accompagnée dans son mouvement par un anticorpuscule qui serait par rapport à lui ce que l'électron positif est à l'électron négatif dans la théorie des trous de Dirac »<sup>252</sup>

De Broglie identifie alors les corpuscules à des neutrinos, idée à la base de ce qui sera connu comme la « théorie neutrinienne de la lumière ».

L'idée physique est séduisante, mais les conséquences de la théorie ne sont pas acceptables. En effet, cette théorie possède la difficulté de ne pas respecter le principe de superposition : si l'on considère que l'état initial du photon est formé d'une superposition de deux ondes planes, alors les champs électromagnétiques résultants ne correspondent pas à la superposition des champs que l'on aurait associés à chacune d'entre elles prises individuellement. Il faut donc une fois de plus adapter le formalisme aux processus physiques que l'on cherche à décrire. Pour ce faire, Louis de Broglie remarque que, comme c'est le cas habituellement en mécanique quantique, la fonction d'onde placée à droite des éléments de matrice doit contenir les informations de l'ensemble du système dans son état initial : il faut donc qu'elle représente l'état initial du corpuscule et de son anticorpuscule associé. Il en est de même pour la fonction d'onde de gauche, censée représenter l'état final du corpuscule. En réalité, les prescriptions du formalisme standard de la mécanique ondulatoire des systèmes de corpuscules sont assez claires dans de tels cas. Elles indiquent que la fonction d'onde totale du système doit être construite à l'état initial comme le produit des fonctions d'onde de chaque sous-système. Le corpuscule est décrit par le spineur de Dirac  $\psi$  obéissant à l'équation de Dirac traditionnelle, alors que de Broglie avance que l'anti-corpuscule peut-être décrit par la fonction d'onde  $\varphi$  obéissant à l'équation d'onde « complémentaire » de Dirac :

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \alpha_1 \varphi - \frac{\partial}{\partial y} \alpha_2 \varphi + \frac{\partial}{\partial z} \alpha_3 \varphi - \kappa \mu_0 c \alpha_4 \varphi \quad (2)$$

Si on accepte ces prémisses, on peut alors penser que la fonction d'onde du système complet peut être définie de la manière suivante :

$$\phi_{ik}(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2) = \varphi_i(x_1, y_1, z_1) \psi_k(x_2, y_2, z_2)$$

C'est-à-dire une fonction d'onde dont les coordonnées spatiales sont celles de l'espace de configuration des deux corpuscules ( $x_1, y_1, z_1$ , pour le corpuscule et  $x_2, y_2, z_2$  pour l'anticorpuscule). Or, de Broglie va prendre des largesses avec les prescriptions de la mécanique ondulatoire des systèmes en vue de construire une théorie beaucoup plus fidèle à son intuition physique du photon. Il décide de construire la fonction d'onde du photon par un procédé que la mécanique ondulatoire des systèmes ne justifie aucunement<sup>253</sup>. Il s'agit d'écrire non pas la fonction d'onde totale en fonction des coordonnées des deux demi-photons, mais d'écrire une fonction d'onde définie dans l'espace physique en trois dimensions, dont les coordonnées représentent le centre de gravité du corpuscule. L'idée alors est de multiplier respectivement l'équation (1) par  $\varphi$  et l'équation (2) par  $\psi$ . En posant  $\phi_{ik}(x, y, z) = \varphi_i(x, y, z) \psi_k(x, y, z)$  (notez l'absence d'indice sur les coordonnées spatiales), ;  $(a_r)_{ik,lm} =$

<sup>252</sup> De Broglie (1934).

<sup>253</sup> Ceci doit cependant être nuancé. Un travail de Jean-Louis Destouches montrera que ce procédé peut se trouver justifier dans le cas de la mécanique ondulatoire de deux corpuscules libres obéissant à l'équation de Schrödinger.

$(\alpha_r)_{il} \delta_{km} ; (\ell_r)_{ik,lm} = -(-1)^r (\alpha_r)_{km} \delta_{il}$  et  $\mu = 2\mu_0$  puis enfin en additionnant et en soustrayant tour à tour les deux équations obtenues, on obtient les deux équations suivantes :

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \phi_{ik}}{\partial t} = \left( \frac{\partial}{\partial x} \frac{a_1 + \ell_1}{2} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{a_2 + \ell_2}{2} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{a_3 + \ell_3}{2} + \kappa \mu c \frac{a_4 + \ell_4}{2} \right) \phi_{ik}$$

$$0 = \left( \frac{\partial}{\partial x} \frac{a_1 - \ell_1}{2} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{a_2 - \ell_2}{2} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{a_3 - \ell_3}{2} + \kappa \mu c \frac{a_4 - \ell_4}{2} \right) \phi_{ik}$$

qui forment les équations d'onde de la mécanique ondulatoire du photon. Les équations de champ, définies cette fois par les relations :

$$\mathcal{V} = K.1 ; \vec{\mathcal{A}} = -K \frac{\vec{a} + \vec{\ell}}{2}$$

$$\vec{\varepsilon} = -\text{grad } V - \frac{1}{c} (\partial \vec{\mathcal{A}}) / \partial t$$

$$\vec{\mathcal{H}} = \text{rot } \vec{\mathcal{A}}$$

$$\vec{E} = \phi_{ik}^0 \vec{\varepsilon} \phi_{ik} ; \vec{H} = \phi_{ik}^0 \vec{\mathcal{H}} \phi_{ik} ; \vec{A} = \phi_{ik}^0 \vec{\mathcal{A}} \phi_{ik} ; V = \phi_{ik}^0 \mathcal{V} \phi_{ik}$$

dans lesquelles  $\phi_{ik}^0$  est l'état final du photon après absorption (c'est-à-dire qu'il décrit un état dans lequel le photon est annihilé). Ces équations sont formellement alors identiques aux « équations de Proca » et obéissent bien au principe de superposition.

On retrouve plus loin dans la théorie du photon, d'autres « largesses » concédées à une application stricte et rigoureuse du formalisme de la mécanique ondulatoire, notamment par exemple dans la définition d'une solution d'annihilation  $\phi_{ik}^0$ <sup>254</sup>, définie assez arbitrairement, ou encore, une condition de normalisation des probabilités, qui diffère de la condition standard ( $\int \sum_{ik} \phi_{ik}^{0*} \frac{a_4 + \ell_4}{2} \phi_{ik} dV = 1$  au lieu de  $\int \sum_{ik} \phi_{ik}^{0*} \phi_{ik} dV = 1$ ).

Ces exemples mettent particulièrement bien en lumière le fait que les représentations imaginées ne sont pas les seuls ressorts de la créativité scientifique chez Louis de Broglie. Les analogies et les identifications formelles (que ce soit entre l'énergie relativiste et l'énergie quantique, entre le principe de Fermat et celui de moindre action, ou encore entre le formalisme de la théorie de Dirac et celui de l'électromagnétisme) jouent un rôle également majeur dans son heuristique de recherche. En revanche, si l'intuitivisme et le formalisme se relaient alternativement dans la première phase de création de la théorie, la seconde phase du travail, qui consiste à donner un sens physique plus précis à la théorie (phase qui correspond, dans notre premier exemple, à la tentative d'interprétation par la théorie de la double solution et, dans le second exemple, à l'établissement d'une mécanique ondulatoire du centre de gravité d'un photon conçu comme la « fusion » entre deux corpuscules), est complètement subordonnée à l'exigence de rendre compatible le formalisme avec la représentation physique qui

<sup>254</sup> Qu'il changera d'ailleurs à plusieurs reprises en raison de problèmes de cohérence interne de la théorie. Il sera même obligé d'introduire une cinquième dimension pour faire en sorte que la solution d'annihilation soit bien une solution de son équation d'onde du photon.

sous-tend la théorie. En somme, le théoricien à image, chez Louis de Broglie, a le dernier mot sur le formaliste.

### c) Les critères de sélection théorique chez Louis de Broglie

Outre les choix des thèmes de recherche et les phases de création théorique, le parcours de Louis de Broglie est également marqué par des choix pour s'inscrire dans certains cadres conceptuels et théoriques au détriment de certains autres. Ici encore, nous examinerons en détail les critères présidant à ces choix dans deux exemples : la préférence portée à la théorie de la double solution sur celle de l'onde-pilote, et celle portée au formalisme de la mécanique ondulatoire sur d'autres formes alternatives de la mécanique quantique. Outre le fait que ces exemples ont l'avantage de mettre particulièrement en évidence ce que je tenterai de montrer, à savoir que la cohérence de la représentation physique du phénomène est beaucoup plus importante chez Louis de Broglie que la rigueur et l'esthétique d'un formalisme mathématique impeccable, ils ont également la caractéristique de mettre à distance d'autres critères de sélection liés au fait que Louis de Broglie a changé d'avis à plusieurs reprises sur l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique. Étant donné que le premier exemple se situe à une période pendant laquelle Louis de Broglie rejetait l'interprétation purement probabiliste, alors que le second correspond à une période pendant laquelle il l'acceptait, j'espère ici mettre en évidence des caractéristiques qui restent stables au cours de ses différents revirements.

#### i- La théorie de la double solution contre la théorie de l'onde pilote

Comme nous l'avons vu précédemment, la théorie de la double solution est une tentative de Louis de Broglie de fournir un aboutissement à ses idées sur la dualité onde-corpuscule tout en restant fidèle à une vision réaliste de la théorie physique. Elle est développée pendant les années 1926 et 1927 et est présentée de manière complète (du moins dans sa première version d'avant les années 1950) dans un article paru dans le *Journal de Physique et le radium*<sup>255</sup>. C'est également à la fin de ce même article qu'est proposée, pour la première fois, la théorie de l'onde pilote, qui sera l'objet d'une autre présentation au cours du conseil Solvay 1927<sup>256</sup>. Je résumerai ici ces deux théories dans leur version non-relativiste<sup>257</sup>, beaucoup moins lourde formellement, mais ne possédant pas beaucoup de différence sur le plan conceptuel.

L'idée de la double solution est de rendre compte du caractère corpusculaire de la matière tout en gardant les bénéfices du formalisme de la mécanique ondulatoire de Schrödinger et de son interprétation probabiliste. Pour ce faire, Louis de Broglie suggère que la réalité physique est décrite par une fonction  $u$  qui possède une singularité (représentant le corpuscule) et qui obéit à l'équation de Schrödinger :

$$-\frac{\hbar^2 \Delta u}{2m} + Vu = i\hbar \frac{\partial u}{\partial t}$$

<sup>255</sup> De Broglie (1927-A).

<sup>256</sup> Conseil Solvay (1928).

<sup>257</sup> Louis de Broglie, quant à lui, traite uniquement la version relativiste (en partant de l'équation de Klein-Gordon), mais cette version n'apporte pas plus d'éclairages sur ce que je veux montrer et apporte un alourdissement mathématique inutile ici.

dont on peut tirer une solution de type :  $u(x, y, z, t) = f(x, y, z, t)e^{i\frac{\varphi(x, y, z, t)}{\hbar}}$ , où  $f(x, y, z, t)$ , qui désigne l'amplitude de l'onde, admet une singularité au point  $M(x_0, y_0, z_0)$ , et où  $\varphi$  représente la phase de l'onde.

En injectant la solution dans l'équation et en séparant la partie réelle de la partie imaginaire, nous obtenons deux équations :

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{f\Delta\varphi}{2m} - \frac{\nabla f \nabla \varphi}{m} \quad (i)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{(\nabla \varphi)^2}{2m} + V - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta f}{f} \quad (ii)$$

L'équation (i) permet alors de calculer la vitesse  $\vec{v}$  avec laquelle se déplace la singularité<sup>258</sup> :

$$\vec{v} = \frac{\nabla \varphi}{m}$$

Et l'équation (ii) devient identique à l'équation d'Hamilton-Jacobi à l'approximation de l'optique géométrique ( $\frac{\Delta f}{f} \approx 0$ ). A côté de l'onde  $u$ , Louis de Broglie admet également une deuxième solution (d'où le nom de la théorie) de l'équation de Schrödinger, celle-ci régulière, qui est simplement la solution traditionnellement admise par la mécanique ondulatoire :

$$\psi(x, y, z, t) = R(x, y, z, t)e^{i\frac{\phi(x, y, z, t)}{\hbar}}$$

En injectant cette seconde solution dans l'équation, on obtient de nouveau deux équations :

$$\frac{\partial R}{\partial t} = -\frac{R\Delta\phi}{2m} - \frac{\nabla R \nabla \phi}{m} \quad (A)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{(\nabla \phi)^2}{2m} + V - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta R}{R} \quad (B)$$

Si l'on admet que les phases des deux solutions  $\varphi$  et  $\phi$  sont toujours identiques, (ce qui peut être le cas, selon (ii) et (B), uniquement si  $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta f}{f}$ )<sup>259</sup>, et que  $\rho(x, y, z, t) = R(x, y, z, t)^2$  représente à l'instant initial la probabilité de trouver la singularité au point  $O(x, y, z)$ , alors, en vertu de l'équation de continuité de l'hydrodynamique - ( $\frac{\partial \rho(x, y, z, t)}{\partial t} = -\nabla(\rho \vec{v})$ ), toujours valable d'après (A), et dans laquelle  $\vec{v} = \frac{\nabla \phi}{m} = \frac{\nabla \varphi}{m} = \vec{v}$  d'après l'égalité des deux phases ( $\varphi = \phi$ ),  $\rho(x, y, z, t)$  représentera à chaque instant ultérieur la probabilité de trouver la particule au point  $O$ . Autrement dit, la solution  $\psi(x, y, z, t)$

<sup>258</sup> Il suffit de calculer la quantité  $(\frac{\partial f}{\partial t} / \frac{\nabla f}{\nabla \varphi})$  au point  $M$  et de remarquer, qu'en ce point,  $\frac{\Delta \varphi}{\nabla f}$  tend vers l'infini

(proximité de la singularité).

<sup>259</sup> Ce qui paraît difficilement admissible près de la singularité. En réalité, cette condition prend une autre forme dans la version relativiste, dont il est plus difficile de démontrer l'impossibilité. C'est sur cette ambiguïté mathématique que le raisonnement de Louis de Broglie peut encore tenir. À partir de 1952, Louis de Broglie changera quelques éléments du formalisme pour éviter cette difficulté.

- conserve son rôle de représentation probabiliste de l'état du corpuscule tandis que  $u(x, y, z, t)$  est la véritable représentation de la réalité physique. La théorie de la double solution offre une représentation du monde qui est très claire en soi : étant admis l'existence d'ondes à singularité, on conçoit que ces singularités se déplaceront en conformité avec les lois de propagation de l'onde. En revanche, elle repose sur des bases axiomatiques et mathématiques bien fragiles. D'une part, aucun principe physique ne vient justifier le fait de l'existence des singularités au sein de l'onde, dont l'introduction, assez artificielle, nuit grandement à la simplicité et à l'élégance du formalisme. D'autre part, aucune justification mathématique ne vient apporter la preuve de la possibilité qu'une onde à singularités et une onde régulière, obéissant à la même équation d'onde, puissent à chaque moment posséder la même phase.

Conscient de ces faiblesses, Louis de Broglie proposera donc une seconde version de son interprétation causale de la théorie quantique : la théorie de l'onde pilote. Celle-ci consiste essentiellement en un allègement de la structure mathématique de la double solution. En effet, la solution à singularité  $u$  y est oubliée, et ne reste plus que la solution régulière. À la place de la solution singulière est introduit un point matériel dont la fonction d'onde fournit la probabilité de présence. Il est alors simplement exigé que ce point matériel se déplace selon la « loi de guidage »  $\vec{v} = \frac{\nabla\phi}{m}$  qui garantit le fait que la distribution de probabilité soit toujours conforme à ce qu'indique la fonction  $\psi$ . En résumé, la théorie de l'onde pilote est prédictivement totalement équivalente à la théorie de la double solution, mais elle est en revanche beaucoup plus simple sur le plan formel, voir beaucoup plus élégante dans la mesure où elle peut se résumer à la dynamique newtonienne d'un point matériel qui subirait, en plus des forces classiques traditionnelles (champs électromagnétique et gravitationnel), une force quantique, selon l'équation suivante :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla(V - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta R}{R})$$

Dans laquelle  $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta R}{R}$  fait office de véritable *potentiel quantique*, dont la présence traduirait sur le plan formel la seule différence entre la dynamique quantique et la dynamique classique des particules. Pourtant, dès sa présentation, Louis de Broglie émettra des réserves sur cette version minimaliste (tronquée, préférera-t-il dire lui-même) de son interprétation :

« ce ne peut-être, je crois, qu'une attitude provisoire. Il faudra bien, sans doute, réincorporer le corpuscule dans le phénomène ondulatoire et l'on sera probablement ramené à des idées analogues à celles qui ont été développées plus haut [soit la théorie de la double solution]<sup>260</sup> »

Il renouvellera cette remarque lors du Conseil Solvay de 1927, alors même qu'il avait choisi, pour éviter les objections d'ordre mathématique que l'on vient de signaler, de présenter ses vues sous la forme de la théorie de l'onde pilote. Or, il s'agit justement d'un choix qu'il regrettera par la suite :

« Je me suis aperçu à ce moment qu'en adoptant cette sorte de ligne de repli, j'affaiblissais beaucoup ma position. En effet, si l'hypothèse de la double solution est difficile à justifier mathématiquement, elle est cependant susceptible en cas de succès d'offrir une vue très profonde de la constitution de la matière et de la dualité des ondes et des corpuscules<sup>261</sup>. »

<sup>260</sup> De Broglie (1927-A).

<sup>261</sup> De Broglie (1952), p. 131.



Il refusera d'ailleurs, à la réception de l'article de David Bohm, qui, en 1951, retrouvera indépendamment de Louis de Broglie la théorie de l'onde pilote, d'envisager un retour vers cette théorie. Peu de temps après sa réception, Louis de Broglie écrira effectivement une courte note aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences*<sup>262</sup> dans laquelle il explicitera toutes les réserves que suscite chez lui l'onde pilote. Si on met de côté les objections purement techniques (et d'ailleurs partiellement levées par le travail de Bohm<sup>263</sup>), la critique se concentre sur le double statut que possède la fonction d'onde  $\psi$  dans la théorie. Tout d'abord, cette fonction d'onde conserve son statut épistémique en raison de son interprétation probabiliste. Mais en outre, on doit également lui attribuer un statut physique si on veut éviter d'admettre que le mouvement de la particule soit guidé par une fonction représentant « des possibilités qui ne sont pas réalisées<sup>264</sup> ». Or, certains éléments viennent fragiliser la pertinence d'attribuer à une telle onde un caractère physique. D'une part, son caractère complexe et son espace de propagation (l'espace de configuration) semble difficilement compatible avec sa prétention à représenter le réel. D'autre part, dans le cas des problèmes physiques de type EPR, on serait obligé d'admettre que la mesure effectuée sur une particule peut influencer instantanément et à distance une autre particule pouvant être située dans une toute autre région de l'espace<sup>265</sup>. Même si Louis de Broglie admet que la théorie de l'onde pilote ne rentre pas dans le domaine de validité du théorème de Von Neumann sur l'impossibilité des variables cachées, il conclut sa note en indiquant que « la théorie de l'onde pilote [...] [lui] paraît toujours se heurter à des difficultés insurmontables, principalement en raison de l'impossibilité d'attribuer à l'onde  $\psi$  une réalité physique ou d'admettre que le mouvement d'un corpuscule est déterminé par des mouvements possibles qui ne sont pas réalisés<sup>266</sup> »

Si donc Louis de Broglie se montre très critique envers la tentative de Bohm de ressusciter la théorie de l'onde pilote en 1951, il se montrera en revanche rapidement beaucoup plus enthousiaste pour les travaux de Jean-Pierre Vigié sur la théorie de la double solution, comme le montre sa réaction selon laquelle « si l'on parvenait à justifier la théorie de l'onde-pilote<sup>267</sup>, ce ne pourrait être que sous sa forme primitive de la double solution de la manière indiquée par M. Vigié... »<sup>268</sup>. Les raisons pour une telle différence de traitement entre les deux théories ne sont pas difficiles à

<sup>262</sup> De Broglie (1951-C),

<sup>263</sup> Notamment la réponse à une objection formulée par Pauli au Conseil Solvay de 1927 et que l'on peut résumer en disant que les valeurs des grandeurs attribuées par la théorie de l'onde pilote ne correspondent pas généralement (mis à part pour la grandeur position et quelques cas particuliers d'autres grandeurs) aux valeurs propres des opérateurs hermétiques associés. David Bohm y répond en introduisant une nouvelle théorie de la mesure : l'acte de mesure « force » les grandeurs à posséder une des valeurs du spectre des opérateurs.

<sup>264</sup> Les termes de la fonction d'onde qui représenteraient les possibilités non sélectionnées par la future expérience auraient effectivement un impact sur la forme du potentiel quantique.

<sup>265</sup> Il s'agit bien sûr du problème de localité. À cet égard, et pour être complet sur les objections de Louis de Broglie, il faut préciser la chose suivante : on peut définir deux sortes de non-localité à partir des propriétés de la fonction d'onde. Le premier se manifeste dans le cas des particules corrélées et est en rapport avec le caractère polydimensionnel de la fonction d'onde. Le second se manifeste même pour un système composé d'une unique particule, et découle de la réduction du paquet d'onde (cette non-localité avait été illustrée par Einstein lors du Conseil Solvay de 1927). Or, bien qu'il ne les distingue pas explicitement, des passages du texte de Louis de Broglie montrent qu'il fait référence à ces deux types pour critiquer la théorie de Bohm alors que celle-ci propose une théorie de la mesure dont un des objectifs explicites est justement d'éviter la seconde (sans, cependant, éviter la première).

<sup>266</sup> De Broglie (1951-C).

<sup>267</sup> Comprendre : « la formule de guidage que la théorie de la double solution et de l'onde pilote possède en commun ».

<sup>268</sup> De Broglie (1951-D).

comprendre. La théorie de la double solution conserve l'ambition de représenter la réalité par une onde (à singularité) qui possède une nature réelle (au sens mathématique du terme), et qui se propage dans un espace à 3 dimensions. Le fait qu'il n'existe alors guère de bases mathématiques solides pour réaliser un tel programme ne semble pas peser lourd comparé au fait que cette théorie propose une représentation bien plus crédible et attractive pour Louis de Broglie de la réalité physique.

## ii- Mécanique ondulatoire et mécanique quantique

Louis de Broglie n'a jamais cédé à l'injonction de privilégier l'appellation de « mécanique quantique » sur celle de « mécanique ondulatoire ». Ceci peut se comprendre dans une certaine mesure d'un point de vue psychologique : on peut aisément admettre qu'il soit resté affectivement attaché à l'appellation de la version de la mécanique quantique dont il est un des pères fondateurs. On pourrait également être tenté d'expliquer cette idiosyncrasie<sup>269</sup> par le fait que Louis de Broglie fut pendant certaines périodes un opposant à l'« orthodoxie quantique », mais ce serait oublier qu'il ne le fut pas pendant près de vingt-cinq ans, période durant laquelle il continua pourtant à privilégier l'appellation « ondulatoire ». Une autre hypothèse, souvent avancée par un certain nombre de physiciens actuels<sup>270</sup>, serait de dire que Louis de Broglie n'aurait jamais compris la manière dont la mécanique ondulatoire dérivait d'une théorie beaucoup plus générale, théorie dont l'essence est exprimée dans sa forme la plus fondamentale soit par la théorie des transformations de Dirac-Jordan, soit par le formalisme de l'espace d'Hilbert développé par John Von-Neumann, soit encore par celui des bras et des kets de Dirac. Or, s'il est vrai que Louis de Broglie n'a jamais utilisé le formalisme des bras et des kets (comme la plupart des physiciens de sa génération), ou celui mathématiquement plus rigoureux de John Von Neumann (*idem*), il a cependant enseigné la théorie des transformations de Dirac-Jordan dont il en a d'ailleurs fait usage dans ses propres travaux.

En contraste avec ces croyances sur le positionnement de Louis de Broglie, l'idée existe également que ce choix d'appellation serait de l'ordre de l'anecdote et n'aurait finalement pas d'importance sur la manière de concevoir et de pratiquer la théorie<sup>271</sup>. Je vais essayer de montrer dans les lignes qui suivent que cette appellation n'est ni anecdote, ni la traduction d'une mauvaise compréhension par Louis de Broglie de la théorie des transformations. Au contraire, ce choix d'appellation peut se comprendre par la tendance de Louis de Broglie à privilégier l'image physique (quand bien même elle est reconnue être une représentation illusoire de la réalité) plutôt que la simplicité et la pureté du formalisme.

Pour avoir les idées claires, je propose un petit rappel du lien entre le formalisme quantique général et celui de la mécanique ondulatoire. La mécanique quantique indique qu'un système physique peut être représenté par un objet mathématique  $\psi$  possédant toutes les propriétés mathématiques d'un vecteur et dont l'évolution obéit à l'équation

$$H\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

<sup>269</sup> Qui n'était cependant que relative : cette appellation n'est pas si peu courante que cela dans la première partie du XX<sup>e</sup> siècle, dans le contexte français, mais aussi parfois ailleurs. En anglais, le terme *wave-mechanics* était également courant.

<sup>270</sup> C'est en effet une explication spontanée que j'ai entendue à plusieurs reprises au cours de discussions informelles avec un certain nombre de physiciens.

<sup>271</sup> C'est par exemple l'avis de Maurice Lévy (2011).

où  $H$  est l'opérateur hamiltonien du système. Tout comme une équation vectorielle, cette dernière équation peut également s'écrire en fonction des composantes de  $\psi$ . Ces dernières sont relatives à une base de coordonnées définie par les vecteurs propres des opérateurs associés aux grandeurs du système physique. Ainsi, l'opérateur impulsion  $P$  possède un spectre de valeurs propres associées à des vecteurs propres  $\psi_p$  formant une base orthonormée dans l'espace des états. L'équation d'évolution du vecteur d'état peut alors s'écrire dans cette base en fonction des composantes  $C_p$  du vecteur d'état qui lui correspond, et qui sont définies par le produit scalaire de  $\psi$  et  $\psi_p$  :

$$C_p = (\psi_p, \psi).$$

L'équation devient alors :

$$(\psi_p, H\psi) = \frac{i\hbar \partial C_p}{\partial t} \text{ (pour chaque } p)$$

Or, on peut également définir la base des vecteurs propres  $\psi_x$  de l'opérateur position<sup>272</sup>  $X$ . Dans cette base, les composantes du vecteur d'état sont :

$$C(x) = (\psi_x, \psi).$$

Et l'équation d'évolution devient :

$$(\psi_x, H\psi) = \frac{i\hbar \partial C(x)}{\partial t}$$

Qui prend la forme d'une équation d'onde qui n'est rien d'autre que l'équation de Schrödinger. Formellement, la différence entre la mécanique quantique et la mécanique ondulatoire est donc équivalente à la différence entre l'expression vectorielle de la dynamique de Newton et son expression dans une base spécifiée (par exemple, un repère orthonormé centré sur le centre de masse)<sup>273</sup>.

La mécanique ondulatoire apparaît alors comme une formulation de la mécanique quantique qui n'a rien de particulier. Elle est seulement une « représentation » de la mécanique quantique parmi d'autres, et la théorie des transformations, qui permet de passer d'une représentation à une autre par l'intermédiaire des « matrices de passage », ne lui donne aucun statut privilégié. Pour justifier alors son importance dans la pratique effective des physiciens, on peut bien sûr parler des circonstances historiques qui ont mené à la formulation de la mécanique quantique. Si l'ensemble du formalisme quantique était potentiellement contenu dans les travaux de 1925 de Dirac, Heisenberg, Jordan et Born, c'est bien celui de la mécanique ondulatoire qui a mis en avant l'importance de l'objet mathématique symbolisant l'état du système, c'est-à-dire la fonction d'onde qui sera par la suite

<sup>272</sup> On passe ici sur les difficultés mathématiques qui rendent la définition du vecteur propre de l'opérateur position peu rigoureux.

<sup>273</sup> L'opération de passage de l'équation  $H\psi = \frac{\partial \psi}{\partial t}$  à l'équation de Schrödinger de la mécanique ondulatoire est équivalente à l'opération de passage du PFD  $\vec{F} = m\vec{\gamma}$  aux équations  $F_x = m\gamma_x$  ( $x=1,2,3$ ). L'opération que nous avons décrite dans le corps du texte consiste à projeter l'équation sur les vecteurs de la base, ce qui correspond dans le cas Newtonien à faire l'opération :  $\vec{e}_x \cdot \vec{F} = m\vec{e}_x \cdot \vec{\gamma}$  où  $\vec{e}_x$  ( $x=1,2,3$ ) représentent les vecteurs unités de la base.

généralisée par le concept de vecteur d'état. Pourtant, cette importance n'est pas seulement un accident de l'histoire. Premièrement, le formalisme de la mécanique quantique écrit sous cette forme permet en effet aux physiciens de mobiliser facilement les outils mathématiques qui étaient utilisés en physique classique. Deuxièmement, elle permet une approche beaucoup plus intuitive des problèmes physiques puisque le vecteur d'état peut alors être représenté comme une onde se propageant dans un espace. Ce formalisme est donc privilégié par les physiciens dans la plupart des problèmes concrets, que ce soit en physique atomique, en chimie quantique et même souvent dans les théories électroniques des métaux. Ainsi, Louis de Broglie justifie après son revirement de 1951 sa préférence pour le terme de mécanique ondulatoire de la manière suivante :

« Les auteurs qui écrivent aujourd'hui des traités de Mécanique quantique ne parlent plus guère des idées de base qui lui ont donné naissance. Ils paraissent même préférer ce terme de « Mécanique quantique » à celui de « Mécanique ondulatoire » qui leur paraît peut-être évoquer une image physique inexacte et inutile. C'est cependant la Mécanique ondulatoire et les équations d'ondes qui en sont sorties qui restent à la base de tous les développements mathématiques des théories quantiques actuelles et, sans elles, il n'y aurait peut-être pas à l'heure présente de traités de Mécanique quantique. En reniant les intuitions physiques qui ont guidé les fondateurs de la Mécanique ondulatoire, les auteurs de traités de Mécanique quantique ressemblent un peu à des enfants qui ne voudraient plus reconnaître leurs parents<sup>274</sup> »

Cependant, la mobilisation du formalisme ondulatoire est beaucoup moins pertinente dans la description d'un système physique qui possède une énorme importance : l'oscillateur harmonique. Il est en effet beaucoup plus aisé de calculer les valeurs propres d'un oscillateur harmonique en les dérivant de seules propriétés de non-commutation des opérateurs constituant l'Hamiltonien qu'en résolvant l'équation aux valeurs propres de Schrödinger. Or, le modèle de l'oscillateur harmonique va avoir notamment un rôle décisif dans l'élaboration de la physique quantique relativiste, tandis que le développement d'équations d'onde relativistes va se heurter à de nombreuses difficultés, comme nous l'avons déjà mentionné<sup>275</sup>.

Deux façons de poser le problème se font donc face, avec des succès inégaux, dans le développement de la physique quantique relativiste. La première, caractéristique de l'oscillateur harmonique, peut être qualifiée d'« algébrique » : elle consiste à résoudre les problèmes à partir des propriétés algébriques des opérateurs de l'Hamiltonien (ou du Lagrangien), et sera essentiellement utilisée en théorie quantique des champs (champs qui peuvent être modélisés par un ensemble d'oscillateurs harmoniques<sup>276</sup>). La seconde, ondulatoire, consiste à tenter de résoudre le problème en posant une équation d'onde représentant la dynamique d'une particule, ou d'un ensemble de particules. La première, qui naît dans la tentative de fournir un traitement quantique au champ électromagnétique, apparaît très vite comme un moyen naturel de rendre compte de la création et de l'annihilation de particule. Or, la seconde permet beaucoup plus difficilement de gérer ce genre de situation : la fonction d'onde possède un nombre d'arguments fixe qui ne dépend que du nombre de particules à l'état initial. Pourtant, un subterfuge, dont l'inspiration vient de Dirac, peut être tenté dans l'optique de prolonger en principe la pertinence conceptuelle de la mécanique ondulatoire dans le cadre de la physique quantique relativiste : il s'agit de considérer que le nombre de particules reste

<sup>274</sup> De Broglie (1956-C), p. 203.

<sup>275</sup> Voir annexe 2.

<sup>276</sup> Ce n'est pas tout à fait vrai pour les champs fermioniques, mais la méthode d'obtention des valeurs propres reste très similaire dans son principe.

toujours fixe, mais de définir des états d'« annihilation », états dans lesquels les particules sont inobservables. Cette stratégie est bien sûr celle adoptée par Dirac dans sa théorie des trous. Mais sa genèse remonte au traitement d'un ensemble de bosons dans son travail séminal sur l'électrodynamique quantique de 1927 :

« The light-quantum has the peculiarity that it apparently ceases to exist when it is in one of its stationary states, namely, the zero state, in which its momentum, and therefore also its energy, are zero. When a light-quantum is absorbed it can be considered to jump into this zero state, and when one is emitted it can be considered to jump from the zero state to one in which it is physically in evidence, so that it appears to have been created<sup>277</sup> »

Bien que conceptuellement très claire, cette stratégie est inapplicable en pratique, du moins en l'état, en raison du fait qu'il faudrait concevoir un réservoir d'une infinité de particules dans l'état d'annihilation (le « zero state » de Dirac), et donc attribuer à la fonction d'onde une infinité d'arguments. Mais une procédure formelle vient sauver la possibilité d'appliquer cette conception : il s'agit de la seconde quantification<sup>278</sup>.

Dans cette perspective, la « première quantification » consiste à partir d'une théorie de particule dont l'Hamiltonien  $H(p, q)$  définit les équations du mouvement (équations canoniques) et à élever au rang d'opérateur les variables dynamiques ( $p$  et  $q$ ) en respectant les « conditions de non-commutations canoniques » puis à écrire l'équation de Schrödinger, soit les opérations formelles :

$$H(p, q) \rightarrow \hat{H}(\hat{P}, \hat{Q}) ; [\hat{Q}, \hat{P}] = i\hbar$$

$$\hat{H}(\hat{P}, \hat{Q})\psi(q, t) = i\hbar \frac{\partial \psi(q, t)}{\partial t} (*)$$

La seconde quantification est alors un jeu formel qui consiste à considérer l'équation d'onde de Schrödinger comme une équation « canonique » d'une théorie classique dérivant de l'Hamiltonien  $\mathcal{H}(\frac{\psi^*}{i\hbar}, \psi) = \psi^* \hat{H}(\hat{P}, \hat{Q})\psi$ , et a, ensuite, réitéré les opérations formelles de quantification :

$$\mathcal{H}\left(\frac{\psi^*}{i\hbar}, \psi\right) \rightarrow \hat{\mathcal{H}}\left(\frac{\hat{\psi}^*}{i\hbar}, \hat{\psi}\right) ; \left[\frac{\hat{\psi}^*(q)}{i\hbar}, \hat{\psi}(q')\right] = i\hbar \delta(q - q')$$

$$\hat{\mathcal{H}}\left(\frac{\hat{\psi}^*}{i\hbar}, \hat{\psi}\right) \Psi(\psi(q, t)) = i\hbar \frac{\partial \Psi(\psi(q, t))}{\partial t} (**)$$

Où  $\Psi(\psi(q, t))$  est la nouvelle fonction d'onde se propageant dans un espace de configuration ayant une infinité continue de dimensions dont chaque axe correspond à l'amplitude  $\psi(q, t)$  en un point  $q$  de l'espace physique. Les propriétés de commutation des opérateurs permettent alors de définir les valeurs propres de l'Hamiltonien, ainsi que les valeurs propres d'autres quantités comme la quantité de mouvement totale, la charge totale, le moment cinétique total... :

<sup>277</sup> Dirac (1927), pp. 260-261.

<sup>278</sup> Dirac n'appliquera alors cette stratégie qu'aux photons, pensant qu'il doit exister une différence entre le traitement quantique de la lumière et celui de la matière. De Broglie, quant à lui, cherche une description théorique unifiée.

$$\hat{\mathcal{H}}\left(\frac{\hat{\psi}^*}{i\hbar}, \hat{\psi}\right) \Psi_{n_1, n_2, \dots}(\psi(q, t)) = \left(\sum_{l=1, 2, \dots} n_l \hbar \nu_l\right) \Psi_{n_1, n_2, \dots}(\psi(q, t)) \text{ etc. (***)}$$

Où  $\nu_l$  sont les fréquences des modes propres de l'onde  $\psi(q, t)$  et  $n_l$  des entiers. Le caractère discret de ces valeurs propres permet alors une interprétation corpusculaire :  $n_l$  est le nombre de particules dont l'énergie est  $\hbar \nu_l$ . A priori, on peut se demander ce que ce jeu formel a à voir avec la mécanique ondulatoire des systèmes de corpuscules. Or, Dirac démontre dans son travail un résultat extrêmement important. Il montre en effet que la mécanique ondulatoire des ensembles de corpuscules développée par la méthode de l'espace de configuration permet d'obtenir, grâce à la théorie des transformations, une équation qui possède exactement la même structure que l'équation<sup>279</sup> (\*\*). Il suffit pour cela de passer de la représentation  $q$  de l'espace de configuration définie par les coordonnées des différentes particules (représentant le schéma des probabilités pour que la particule  $k$  se trouve au point  $q_k$  etc...) à la représentation  $n$  définie par l'occupation des états par les particules (représentant le schéma des probabilités pour que  $n_l$  particules se trouvent dans l'état  $l$ ). Lorsque les particules sont soumises à un potentiel dépendant du temps leur permettant de passer d'un état à un autre, les processus de création et d'annihilation (alors considérés comme de simples passages entre états) peuvent être convenablement décrits en ajustant les éléments de matrice du potentiel qui couplent les états d'annihilation avec les autres états (et qui représentent donc la probabilité par unité de temps de telles transitions), de manière à ce que le nombre infini de particules présentes dans cet état ne mène pas à des probabilités de transition infinies.

Autrement dit, la seconde quantification apparaît comme un procédé formel permettant de répondre plus rapidement que la mécanique ondulatoire dans l'espace de configuration à la question : « quelle est la probabilité pour que  $n_l$  particules se trouve dans l'état  $l$  etc... », et peut donc être vue, par Louis de Broglie, comme une simple méthode de calcul<sup>280</sup> qui ne remet nullement en cause la validité générale des concepts de la mécanique ondulatoire : c'est-à-dire que le monde peut encore être conçu comme étant constitué de corpuscules associés à des fonctions d'onde représentant leur état. C'est pourquoi la seconde quantification est, aux yeux de Louis de Broglie, tout à fait légitime et qu'il ne se privera pas de l'appliquer à sa propre mécanique ondulatoire du photon. Bien que pouvant être qualifiée « d'algébrique », cette méthode peut toujours s'inscrire dans la perspective « ondulatoire » de Louis de Broglie, comme l'indique d'ailleurs l'emploi par de Broglie des termes « mécanique ondulatoire du photon superquantifiée »<sup>281</sup>. Or, comme nous l'avons invoqué précédemment, une autre perspective, celle de la théorie quantique des champs, qui joue dès le départ la carte de la stratégie « algébrique », sera catégoriquement écartée par lui.

Formellement complètement identique à la seconde quantification, à un tel point que Louis de Broglie est un des rares physiciens à prendre autant de soin à les distinguer, la théorie quantique des

<sup>279</sup> Au passage, l'importance prise par cette démonstration dans les travaux de Louis de Broglie pendant sa période « orthodoxe » suffit à répondre à la suspicion dont il a fait l'objet de ne pas avoir intégré à sa réflexion la théorie des transformations et d'en être resté à une image « naïvement ondulatoire » de la mécanique quantique.

<sup>280</sup> Louis de Broglie concèdera tout de même que le formalisme de la seconde quantification apporte une nouveauté par rapport à celui de la mécanique ondulatoire des systèmes de corpuscules : « En seconde quantification, les phases (des différents modes d'onde) sont des observables au même titre que les  $n$ , et c'est là l'apport essentiellement nouveau de la seconde quantification pour les particules à fonction d'onde symétriques » (de Broglie (1957), p. 98). Reste que la terminologie désignant les objets de la théorie (« particules à fonction d'onde ») renvoie toujours à une « ontologie » qui reste la même qu'en mécanique ondulatoire.

<sup>281</sup> La « superquantification » est synonyme de seconde quantification. Ce terme a en plus l'avantage de permettre l'emploi d'un participe passé.



champs en diffère uniquement dans l'interprétation qu'elle donne à l'équation d'onde (\*). Celle-ci est en effet directement conçue comme une équation de champs classique, et non pas comme le processus d'une « première quantification » d'une théorie classique de corpuscules. L'aspect particulaire émerge seulement dans un second temps, après quantification de la théorie (il n'y a à cet égard plus de « seconde quantification », il n'y a qu'une théorie classique que l'on quantifie une fois), et par l'intermédiaire du calcul des valeurs propres des différents opérateurs (équations \*\*\*). Autrement dit, alors qu'une théorie « superquantifiée » part d'une « ontologie » corpusculaire sur laquelle vient se greffer le concept d'onde de la mécanique ondulatoire (étape de première quantification) puis un procédé formel qui permet d'envisager le traitement des systèmes de corpuscules (étape de seconde quantification), la théorie quantique des champs part quant à elle d'une « ontologie » ondulatoire<sup>282</sup> sur laquelle vient se greffer le caractère discontinu (quantification) de l'aspect corpusculaire de la matière (les particules sont alors vues comme des quanta de champs).

Or, si les deux points de vue mènent quasiment aux mêmes résultats<sup>283</sup>, Louis de Broglie prend bien le soin d'insister qu'à ces yeux, le premier est plus fondamental que le second :

« Nous plaçant à un point de vue assez différent [de celui la théorie quantique des champs], nous avons développé depuis 1934 une Mécanique ondulatoire du photon **qui a l'avantage de bien montrer comment la théorie de la lumière vient trouver sa place dans le cadre général de la Mécanique ondulatoire**, tout en permettant de retrouver par l'application directe de la seconde quantification la plupart des résultats essentiels de la théorie quantique des champs [...]

Malgré les points délicats qui subsistent en Mécanique ondulatoire du photon et que nous n'avons pas cherché à dissimuler, il nous semble certain que **cette théorie garde le mérite de faire voir clairement le véritable sens physique du formalisme assez abstrait de la théorie quantique des champs** et de préciser bien des questions qui restent obscures dans les exposés qu'on en fait habituellement<sup>284</sup>. »

Le point crucial est l'attention apportée « au véritable sens physique du formalisme ». Et le véritable sens, la véritable image, la véritable intuition qui fonde la mécanique quantique (dont l'expression la plus fondamentale reste la mécanique ondulatoire) est pour de Broglie de représenter « l'état d'un corpuscule par une certaine fonction d'onde  $\psi(x,y,z,t)$  définie en chaque point de l'espace et à chaque instant  $t$  <sup>285</sup> ». Peu importe donc si l'expression la plus fidèle à cette intuition physique ne possède pas la forme mathématiquement la plus générale de la théorie, peu importe si elle mène à des développements (comme celui de la mécanique ondulatoire du photon) d'une considérable lourdeur mathématique au détriment d'autres formalismes certes plus abstraits mais formellement « très élégant et mathématiquement correct<sup>286</sup> ». Le plus important est que le premier « paraît serrer de

<sup>282</sup> Les emplois successifs du terme « ondulatoire » peuvent sans doute ici amener à une incompréhension. Je précise donc qu'il faut bien ici distinguer son emploi lorsqu'il se réfère à la « perspective » (il se réfère alors à la version « mécanique ondulatoire » de la mécanique quantique) et lorsqu'il se réfère à la « l'ontologie » (il se réfère alors à la théorie quantique des champs).

<sup>283</sup> Ceci n'est pas exactement vrai dans le cas de la mécanique ondulatoire du photon, essentiellement parce que dans ce cas précis, les équations d'ondes qui sont quantifiées ne sont pas les mêmes : la théorie quantique des champs quantifie directement les équations de Maxwell alors que la « mécanique ondulatoire du photon » quantifie l'équation d'onde du photon que nous avons présenté plus haut. Mais les prédictions entre ces deux théories sont tout de même souvent identiques.

<sup>284</sup> De Broglie (1957), p. v. Ce qui est en gras est souligné par moi.

<sup>285</sup> *Ibid.* p. 1.

<sup>286</sup> *Ibid.* p. 143.

plus près la réalité physique<sup>287</sup> » tandis que le second « masque peut-être un peu le sens des phénomènes physiques qu'il représente<sup>288</sup> ».

#### d) Conclusion

Reprenant les catégories sur le style de recherche que j'ai proposées dans la section c), comment pouvons-nous y placer Louis de Broglie à la lumière des développements précédents ? Tout d'abord, il paraît évident que Louis de Broglie n'a rien du physicien mathématicien tel que je l'ai défini. La perfection mathématique fait défaut par exemple à sa théorie de la double solution, et son principal souci n'est jamais celui de perfectionner le formalisme mathématique ou les méthodes de résolutions de problème. Au contraire, son souci du « sens physique » plutôt que de la rigueur mathématique me paraît tout à fait caractéristique du physicien théoricien. En revanche, son positionnement par rapport aux autres catégories est beaucoup plus subtil.

Théoricien structural, et plus spécifiquement « à image », Louis de Broglie l'est incontestablement. Mais cette caractéristique joue un triple rôle correspondant à trois moments de l'activité théorique : heuristique, d'ajustement et critique. Heuristique, parce que c'est souvent par l'intuition physique, à travers l'évocation d'une image (par exemple le mouvement périodique interne, l'onde dans un milieu fermé...), que le processus théorique démarre. D'ajustement, parce qu'une fois que l'image physique a pris une forme plus précise, grâce notamment à son co-développement avec le formalisme, celle-ci a le pouvoir de contraindre celui-là à s'adapter à elle : ainsi la solution de l'équation d'onde devra être choisie en fonction de la représentation que Louis de Broglie se fait du corpuscule dans la théorie de la double solution, ainsi également l'équation d'onde du photon devra être adaptée à la structure qu'a choisie Louis de Broglie de prêter à la particule. Critique enfin, parce qu'une théorie ou un formalisme sera jugé en fonction de sa capacité à traduire le plus fidèlement et le plus exhaustivement possible les processus physiques dont il est censé rendre compte : ainsi la préférence de Louis de Broglie pour la théorie de la double solution plutôt que pour celle de l'onde-pilote, ainsi également la préférence de Louis de Broglie pour la mécanique ondulatoire du photon plutôt que pour la théorie quantique des champs qui, à travers le modèle de l'oscillateur harmonique, suggère une image de la particule (comme quanta de champs) qui ne paraît pas adaptée à la représentation que Louis de Broglie se fait du corpuscule<sup>289</sup>.

Pourtant, contrairement aux dichotomies qui apparaissent dans la présentation des catégories, la catégorie de « théoricien à image » ne s'oppose pas toujours à celle du formaliste, dont certaines caractéristiques sont également présentes chez Louis de Broglie à certaines étapes de l'activité théorique. C'est effectivement bien le formalisme d'Hamilton-Jacobi qui suggère un rapprochement entre l'optique géométrique et la mécanique, et à partir de là, entre la nature de la lumière et celle de la matière. C'est encore le formalisme relativiste qui permet d'exprimer, de manière très convaincante, le

---

<sup>287</sup> *Ibid.*, p. 138.

<sup>288</sup> *Ibid.*, p. 143.

<sup>289</sup> Effectivement, pour compléter le contenu de la section précédente, un autre argument dont Louis de Broglie fait usage contre la théorie quantique des champs est la présence des termes « parasites » en  $\frac{1}{2}h\nu$  présents dans les valeurs propres des hamiltoniens de champs, et qui fait penser à Louis de Broglie que l'interprétation des particules en termes d'excitations d'un ensemble d'oscillateurs harmoniques représentant les différents modes du champ n'est pas la plus appropriée.

rapport entre l'énergie d'une particule et la fréquence d'une onde, et, à partir de là, entre l'action de la première et la phase de la seconde. C'est enfin le formalisme qui permet d'entrevoir un rapprochement dans la description théorique du photon et de l'électron à partir de la correspondance des propriétés de symétrie des entités mathématiques construites dans le cadre de la théorie de Maxwell et de celles construites dans le cadre de la théorie de Dirac. Louis de Broglie n'hésite donc jamais à user de toutes les potentialités heuristiques des analogies formelles, et suit en cela bien l'injonction d'Einstein à ne pas avoir peur de paraître « un opportuniste épistémologique », du moins en ce qui concerne la phase créative de la recherche. Si cependant le formalisme et l'image physique vont chez Louis de Broglie de concert dans cette première phase, il n'en reste pas moins vrai que l'image prend très clairement le dessus sur le formalisme lors des deux dernières phases, puisqu'en définitive, comme je l'ai dit plus haut, c'est bien l'image du processus physique qui a le dernier mot et qui contraint l'aspect final du formalisme.

Si donc Louis de Broglie paraît être en partie simultanément théoricien formaliste et théoricien à image, il ne paraît à première vue ni être particulièrement un théoricien à principes, ni un théoricien à problème. Du premier, Louis de Broglie ne paraît que modérément partager le souci de bâtir la physique sur des bases axiomatiques fermes à partir desquelles on pourrait tout reconstruire grâce à l'enchaînement déductif. Louis de Broglie est effectivement dans une démarche plus constructiviste, plus modélisatrice. Plutôt que de les faire reposer sur des « principes dématérialisés », il pose l'existence d'entités à partir desquelles il va bâtir les théories, leur impose un substrat (la mécanique ondulatoire est construite pour intégrer à la fois l'aspect corpusculaire et l'aspect ondulatoire ; la mécanique ondulatoire du photon est construite à partir des deux semi-photons censés constitués le corpuscule). Il partage donc le « critère ontologique » du physicien à problème plutôt que celui du physicien à principes. En revanche, Louis de Broglie est méthodologiquement et pédagogiquement plus proche des physiciens à principes que des physiciens à problèmes. Ne s'intéressant qu'à de rares cas à la résolution de problèmes particuliers, Louis de Broglie cherche avant tout à dégager une description des processus fondamentaux du monde physique. En réalité, si les « principes physiques dématérialisés » sont remplacés par la description de la nature et du comportement des éléments fondamentaux de l'univers, l'objectif fondamental est le même : dégager une compréhension synthétique et fondamentale du monde, œuvre unique dont la méthode ne s'apprend pas comme celles de « techniciens » ou « d'ingénieurs » théoriques qui représentent les « théoriciens à problème ».

# Chapitre III- La réception de la mécanique quantique en France

Dans ce chapitre, je commencerai (I) par rendre compte tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif de la manière dont la mécanique quantique s'est implantée dans la pratique des physiciens français au cours des quinze premières années de son existence (1925-1940). J'aborderai ensuite (II) la question de la réception épistémologique et philosophique de cette théorie. J'examinerai enfin (III) le rôle joué dans ces processus par Louis de Broglie et son entourage, que ce soit à travers leur influence scientifique, leur poids institutionnel et leur fonction pédagogique (formation des jeunes chercheurs et suscitation de vocation à travers leurs œuvres de vulgarisation).

## I- Pratique de la mécanique quantique en France (1925-1940)

Je chercherai dans cette section à dégager des constats sur la façon dont la mécanique quantique s'introduit dans la pratique des physiciens français. Une première partie sera consacrée à une étude comparative avec la Grande-Bretagne. Je me baserai sur deux études quantitatives de la physique quantique pratiquée en France et en Grande-Bretagne. La première consiste à tenter de dégager, même si cela est de manière grossière, le nombre de physiciens qui s'occupent de mécanique quantique dans les deux pays. La seconde consiste à comparer leur production en comparant les publications parues dans le *Journal de Physique et le Radium* et dans les *Proceedings of the Royal Society*. Bien que j'aie discuté précédemment de la faiblesse d'une telle approche, des pièges et des biais qu'elle ne manque pas de rencontrer, elle n'est cependant pas inutile et permet, me semble-t-il, de dégager de manière fondée quelques caractéristiques de la physique quantique pratiquée en France. Une discussion de ces résultats, basée sur la littérature secondaire et les témoignages disponibles, permettra de pondérer, de nuancer et de compléter les conclusions que j'en aurai tirées. La seconde partie de cette section sera une étude, cette fois purement qualitative, des travaux quantiques effectués en France par les principaux auteurs. Je n'hésiterai pas à réutiliser les catégories d'analyse sur les différents styles de théoriciens que j'ai présentées au chapitre précédent pour le cas de Louis de Broglie. J'essaierai finalement de rendre apparent les différents groupes de chercheurs qui utilisent la mécanique quantique selon leur style de recherche, leurs intérêts thématiques et leurs relations personnelles mutuelles.

### 1- Poids et usages de la mécanique quantique en France : études comparatives avec la Grande-Bretagne

Je prolonge ici les études quantitatives présentées dans le premier chapitre en me focalisant cette fois spécifiquement sur les travaux portant sur la mécanique quantique ou en faisant usage et sur la communauté des physiciens concernés. Le but de telles études est de tenter de dégager des

spécificités françaises en contraste avec les résultats d'études similaires entreprises pour un pays à priori comparable scientifiquement à la France, la Grande-Bretagne. Pour une telle comparaison, j'ai choisi d'étudier les publications du *Journal de Physique et le radium* pour la France et des *Proceedings of the Royal Society* pour la Grande-Bretagne pour les raisons indiquées dans le premier chapitre. Ces études permettent dans un premier temps de dégager les noms des physiciens quantistes, et ainsi de reconstituer grossièrement les deux communautés, puis ensuite de voir dans quels types de travaux la mécanique quantique est utilisée dans les deux pays. Les résultats sont discutés puis complétés par les témoignages et la littérature secondaire.

a) La communauté des quantistes : une tentative de comparaison avec la Grande-Bretagne

Pour diverses raisons (notamment les différences dans les modalités de publications entre la France et la Grande-Bretagne), j'avais renoncé dans le premier chapitre à entreprendre un comparatif sur le poids absolu pris par les différents champs de recherches afin de ne discuter que de leur poids relatif (quel poids occupe un champ de recherche dans un pays par rapport à l'ensemble de la physique). La situation se présente cependant un peu mieux pour l'étude spécifique de la mécanique quantique. Étant donné le nombre restreint d'articles utilisant ou portant sur cette théorie, il est en effet possible de tenter une estimation approximative du nombre de physiciens de chaque pays pouvant être considérés comme appartenant à une « communauté quantique ». Il sera de plus tout à fait envisageable de distinguer, même pour la Grande-Bretagne, les contributeurs étrangers, qui seront, de fait, écartés du décompte. Par contributeurs étrangers, j'entends les contributeurs n'étant ni de la nationalité du pays étudié, ni présent sur le territoire national au moment d'écrire l'article. Je compterai donc les contributions des étrangers dans la mesure où ils s'intègrent à la communauté des physiciens du pays. En effet, non seulement leurs travaux participent à la production scientifique des laboratoires du pays, mais il m'a semblé également important de prendre en compte le pouvoir attractif et l'ouverture de la communauté en question.

Une telle étude du poids absolu des physiciens quantistes n'est pas forcément pertinente pour dégager des tendances lourdes caractéristiques de chaque pays : l'estimation du poids relatif est pour cela plus adaptée. En revanche, il peut nous renseigner sur la question de savoir pour chaque pays si la communauté en question a atteint un poids critique suffisant pour que la pratique de la mécanique quantique puisse être considérée comme une activité « respectable » ou au contraire marginale. Par exemple, deux pays dans lesquels le poids relatif des physiciens quantistes représenterait, pour chacun des cas, un pour cent de la communauté, ne paraissent pas dans la même situation vis-à-vis de l'implantation de la mécanique quantique selon que l'une des communautés soit composée de cent physiciens (il y aurait dans ce cas un unique physicien quantiste) et l'autre de trois mille physiciens (il y aurait alors une trentaine de quantistes). Même si, en moyenne, la tendance à s'intéresser à cette théorie pour les physiciens de ces deux pays imaginaires est la même, nous empêchant par là même de conclure à une différence entre la culture scientifique de ces deux nations, le physicien isolé du premier pays ne se retrouvera pas du tout dans la même situation que les trente physiciens du second pays. Ces derniers pourront en effet se revendiquer d'une véritable communauté, avec toutes les conséquences que cela implique en termes de visibilité, d'accès à des moyens de publications des travaux, de légitimité scientifique et de capacité à obtenir des postes universitaires consacrés à la discipline et à la mise en place d'enseignement, sans parler d'émulation et de collaborations scientifiques.

J'ai dans le tableau suivant systématiquement répertorié les auteurs publiant des articles sur les théories quantiques dans le *Journal de Physique* et dans les *PRS*, pour les années qui ont été étudiées. Le tableau ci-dessous ne présente qu'une tentative de reconstitution partielle des communautés quantiques de chaque pays, étant entendu qu'il n'est en aucun cas garanti que l'ensemble des physiciens des deux communautés aient publié au cours des années étudiées dans ces deux journaux. Nous pourrions cependant estimer assez facilement le nombre d'oubliés de cette étude grâce à notre connaissance sur la communauté française de cette période et de la littérature secondaire portant sur la physique britannique des années 1920 et 1930, ce qui nous permettra *in fine* de compléter les deux communautés. Voici les résultats :

PRS	JP
Dirac <sup>*290</sup>	De Broglie*
Darwin	L. Brillouin
Flint	Solomon
Fisher	Goldstein
Swirles	Winter
Dennison (Américain présent en 1927)	Elsasser (Allemand présent en France entre 1933-1935)
Born* (Allemand, présent à partir de 1933)	Proca
Hartree	Destouches
Zenner (Américain présent deux ans pendant les années 30)	Zaïcoff (Aucune information)
Jones	Kwall
Massey (Australien présent une grande partie de sa carrière)	L. Nordheim (Allemand, séjourne en France en 1934)
Mohr (Australien qui séjourne pendant les années 30)	F. Perrin
Infield (Polonais présent entre 1933 et 1936)	Petiau
Thompson	R. Dugas
Bhabha (Indien présent une grande partie de sa carrière)	Beck (Autrichien, séjourne en France)
Temple	Mariani
Bethe* (Allemand, présent de 1933 à 1935)	Paulette Février
Heitler (Allemand, présent à parti de 1933)	Yvon
Penney	Tisza (Hongrois, séjourne en France)
Peierls (Allemand, présent à parti de 1933)	Datzeff (Bulgare, séjourne en France)

<sup>290</sup> \* signifie lauréat du prix Nobel.



Mitchell	Tonnelat
Arnot	Bauer
Baines	Ullmo
McLauchlan	London (Allemand, séjourne en France)
Hulme	Kahan
Coulson	
Williams	
Fuchs (Allemand, présent de 1933 à 1937)	
Bates	
Buckingham	
Junwin	
Schott	
Mott *	
Fröhlich (Allemand, présent de 1933 à 1939)	
Kahn	
Jahn (Allemand, présent à partir de 1935)	
Tchatcher (1939)	
Blackman (1939)	
Jucys (Lithuanien, séjourne à la fin des années 1930)	
Kemmer (Russe, présent à la fin des années 1930)	
Total : 40	Total : 25
Dont 15 étrangers	Dont 7 étrangers

Tentons maintenant d'estimer le nombre d'oubliés. À ma connaissance, concernant la France, l'essentiel de cette communauté y est présent. On peut conjecturer qu'il manque quelques personnes ayant publié uniquement quelques papiers dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, mais, si c'est le cas, étant données les contraintes de ce mode de publication<sup>291</sup>, il ne peut s'agir alors que d'auteurs qui ne se sont pas vraiment imposés dans la communauté des physiciens théoriciens français. En outre, il ne paraît pas probable qu'à cette période, un auteur travaillant en France publie

<sup>291</sup> Notamment le fait que l'article ne doit pas dépassé trois pages, ce qui la rend moins attractive qu'une publication dans le *Journal de Physique et le Radium*, du moins pour les travaux importants.

exclusivement à l'étranger, à moins qu'il s'agisse d'un étranger dont le séjour en France a été de courte durée. Reste peut-être des jeunes chercheurs qui débute leur carrière à la toute fin des années 1930, et qui n'ont pas encore eu le temps de publier dans le *Journal de Physique*. Mais cela n'est de toute manière pas en mesure de remettre en cause les conclusions que nous allons tâcher de dégager.

Concernant la Grande-Bretagne, les risques qu'un certain nombre de physiciens passe à la trappe sont plus importants. D'une part, notre sondage dans les *PRS* n'a porté que sur les années 1927, 1934 et 1939. D'autre part, le fait qu'il existe en Grande-Bretagne davantage de supports de publications accroît ce risque. Il faut donc avoir à l'esprit que le nombre de quantistes britanniques est sans doute davantage sous-estimé que le nombre de quantistes français. À titre d'exemple, Von Vleck, Oppenheimer ou Gamow ont publié des articles pendant leur séjour en Grande-Bretagne dans les années 1920. Les Britanniques Blackett, Wilson, Thomas, Gurney, Lennard Jones et Fowler ont également publié des articles utilisant le formalisme de la mécanique quantique dans d'autres journaux que les *PRS* ou à d'autres dates. Birtwistle enseigna les théories quantiques à Cambridge entre les années 1924 et 1929, et publia le premier manuel sur la mécanique quantique<sup>292</sup>. Et cette liste des oubliés n'est sans doute pas exhaustive.

Quoi qu'il en soit, le risque d'absences dans notre recensement britannique ne fait qu'accentuer le poids des conclusions que nous pouvons dégager. Avec une « communauté quantique » que l'on peut raisonnablement estimer à au moins deux fois plus restreinte que celle de la Grande-Bretagne, la mécanique quantique apparaît bien moins implantée en France que chez les voisins d'outre-manche. Une comparaison avec l'Allemagne aurait été sans doute encore plus impressionnante : pour les seules deux années qui succèdent à la création de la mécanique quantique (1925-1927), le nombre de contributeurs germaniques est déjà aussi élevé que le nombre de contributeurs français que nous avons dégagé pour toute la période 1925-1940<sup>293</sup>.

Si nous regardons plus en détail, nous nous apercevons que la différence du nombre d'étrangers dans chaque pays contribue pour beaucoup à ce déséquilibre : il y a effectivement 18 contre 25 locaux (soit deux chiffres relativement comparables) pour 7 contre 15 étrangers (soit plus du double). Le facteur « nombre d'étrangers » contribue à creuser l'écart notamment, mais pas seulement, à partir de 1933. En réalité, il est très simple de proposer au moins deux types d'explications à cet écart. La première part du constat qu'une partie des « immigrés » britanniques viennent d'anciennes colonies (2 Américains, 1 Indien et 2 Australiens) et la seconde de celui que l'autre groupe important vient d'Allemagne (7, sans compter les autres physiciens en provenance d'Europe de l'Est et dont on peut supposer qu'ils ont également rejoint l'Angleterre pour fuir la situation politique de leur pays). Or, l'explication du premier constat est immédiate (proximité culturelle, langage commun), et il n'est pas extrêmement difficile d'en proposer une pour le second : les statuts de l'Université en France à cette période interdisent un étranger de devenir titulaire d'un poste universitaire. En réalité, il n'est guère besoin d'aller jusque là. L'extrême difficulté avec laquelle des physiciens aussi prestigieux que Louis de Broglie (qui n'était toujours pas professeur au moment de recevoir son prix Nobel), Léon Brillouin (qui n'avait pas non plus de poste permanent en 1927, alors qu'il faisait déjà partie du « gratin » mondial de la physique théorique comme en témoigne sa participation au Conseil Solvay)<sup>294</sup> et les jeunes théoriciens montants des années 1930 (Proca, Solomon, Goldstein, Destouches...) ont

---

<sup>292</sup> Birtwistle (1927).

<sup>293</sup> Voir Kojevnikov, Novik (1989). Il y a 23 contributeurs allemands uniquement pour ces deux années. Cependant, la communauté quantiste allemande est sans doute drastiquement réduite à partir de 1933, malgré la conservation d'un noyau dur autour de Heisenberg et de Von Weizsäcker.

<sup>294</sup> Voir Brillouin (1962).

obtenu des postes en adéquation avec leur statut illustre le fait qu'il était sans doute stratégiquement beaucoup plus raisonnable pour les physiciens d'Europe centrale et de l'Est de rejoindre la Grande-Bretagne plutôt que la France<sup>295</sup>. Autre aspect à prendre en compte, les liens entre les physiciens britanniques et les physiciens d'Europe centrale sont sans doute plus forts qu'entre ces derniers et les physiciens français. Ceci est en tout cas particulièrement vrai en ce qui concerne la communauté des microphysiciens. L'amitié forgée par Bohr avec Rutherford et Darwin à Manchester dans les années 1910 n'y est sans doute pas étrangère. Ces deux derniers revenant à Cambridge dans les années 1920, cette amitié fournira les bases de nombreux échanges entre Copenhague et Cambridge, faisant de cette ville un lieu très intégré au réseau de la physique quantique internationale à partir de la fin des années 1920, en contraste avec la fin de règne de J.J. Thomson au laboratoire Cavendish qui était caractérisée par une absence presque totale de prise en considération des développements quantiques<sup>296</sup>.

Nous pouvons également proposer une estimation qualitative assez grossière, mais efficace, de la qualité, ou du moins du statut international de la communauté des deux pays. Il s'agit de compter par exemple le nombre de prix Nobel que chaque communauté regroupe (y compris les prix Nobel « en devenir »). Et là encore, la balance penche d'une manière impressionnante du côté britannique. Un seul lauréat du côté français (Louis de Broglie) contre quatre du côté britannique.

Une fois de plus, l'apport des étrangers contribue à creuser le déséquilibre (2/4 du côté britannique, 0/1 du côté Français). La France a certes eu la chance d'accueillir des physiciens étrangers de grande qualité (notamment Elsasser, Tizsa et F. London) mais ceux-ci n'étaient pas forcément reconnus à leur juste valeur en France, n'ont jamais été en position de construire une carrière solide et sont assez vite repartis. Walter Elsasser venait par exemple de Göttingen où il avait été assistant de Max Born dans un des centres les plus prestigieux de physique théorique au monde du moment<sup>297</sup>. Il n'a trouvé à Paris qu'une modeste table en guise de bureau dans les locaux de l'Institut Henri Poincaré<sup>298</sup> et son statut se résumait à celui de « jeune poulain » de Frédéric Joliot. Fritz London avait également à son actif des travaux d'une grande importance avant son arrivée en France. Il s'était notamment illustré dès 1926 en esquissant indépendamment de Dirac et Jordan une première ébauche de la théorie des transformations en mécanique quantique<sup>299</sup>. Mais son travail le plus célèbre (avant ses travaux sur la supraconductivité) est la description quantique des liaisons covalentes en collaboration avec Walter Heitler<sup>300</sup>. Il ne fut pourtant jamais considéré avec le même égard qu'un grand physicien en France, où il collabora notamment avec Edmond Bauer à une théorie « subjectiviste<sup>301</sup> » de la mesure quantique. Quant aux deux derniers (nous mettons ici à part Nordheim, également un théoricien de grande valeur, mais qui resta très peu de temps en France), ils étaient moins susceptibles d'apporter une valeur ajoutée à la communauté quantique de France. Je n'ai pu obtenir aucune information sur Rachco Zaïcoff (le fait qu'il soit étranger, et qu'il travaillait en France au moment d'écrire les articles au *Journal de Physique* n'est qu'une supposition de ma part), ce qui laisse supposer qu'il n'a jamais réalisé d'avancées fondamentales. Quant à Assène Datzeff, physicien

<sup>295</sup> On pourrait également évoquer l'arrivée manquée d'Einstein au Collège de France dans les années 1930.

<sup>296</sup> Jeff Hughes (1998).

<sup>297</sup> Pour apprécier l'estime dont il bénéficiait à Göttingen, voir par exemple la lettre de Max Born à Albert Einstein (Born (1925), p. 99), où le premier le désigne par « notre maître Elsasser ». Bien sûr, Elsasser n'était pas le maître, mais était au contraire l'élève de Born. Ce que le terme signifie sans doute est qu'il était le « spécialiste maison » de la théorie ondulatoire de la matière dans ce laboratoire à cette époque.

<sup>298</sup> Elsasser (1978), p. 181.

<sup>299</sup> Voir Lacki (2004).

<sup>300</sup> Heitler, London (1927).

<sup>301</sup> Bauer, London (1939).

bulgare, il indique lui-même avoir été sous la tutelle bienveillante de Louis de Broglie pendant son séjour à Paris et confesse qu'il ne maîtrisait pas encore très bien la mécanique quantique<sup>302</sup>.

Au contraire, des personnes comme Max Born, Walter Heitler, Rudolf Peierls, ou encore Nicholas Kemmer eurent la possibilité de se faire une place en Grande-Bretagne et d'apporter une véritable valeur ajoutée. Bien sûr, leur situation ne fut pas facile, et beaucoup d'autres physiciens choisirent finalement d'émigrer aux Etats-Unis. Cependant, la création en 1933 de l'*Academic Assistance Council* (ACC) permit la création de nombreux postes temporaires dédiés aux réfugiés scientifiques<sup>303</sup>. Ceci permit à la Grande-Bretagne de devenir la plus importante terre d'accueil européenne de scientifiques, même s'il fut tout de même difficile pour eux de trouver des postes permanents dans ce pays. Pour se donner une idée de la qualité de ces réfugiés, indiquons que Walter Heitler fut par exemple un des *leaders* de la théorie quantique des champs, et l'ouvrage qu'il a consacré à l'électrodynamique quantique<sup>304</sup> fut le livre à partir duquel une génération de physiciens apprit les rudiments de cette théorie. Rudolf Peierls fut un des *leaders* du programme nucléaire britannique pendant la seconde guerre mondiale, et contribua de manière importante à plusieurs champs de recherche de physique théorique (physique nucléaire, physique du solide...). Nicholas Kemmer contribua également au programme nucléaire britannique et fit des percées décisives en physique des particules élémentaires<sup>305</sup>. Il fut notamment un des mentors du futur prix Nobel Abdus Salam. Enfin, déjà auréolé, en tant qu'un des pères fondateurs de la mécanique quantique, d'un prestige important dès son arrivée en Grande-Bretagne (bien qu'il dût attendre 1954 pour recevoir son prix Nobel), Max Born put mettre ses réseaux, sa parfaite intégration à la communauté des physiciens internationaux et sa capacité à former des jeunes théoriciens au service de sa patrie d'adoption, et ainsi lancer une école de théoriciens des solides à Edinburgh à partir de 1936. Par ailleurs, des théoriciens comme H. A. Jahn, H.J. Bhabha, Leopold Infeld ou encore Herbert Fröhlich, pour ne citer qu'eux, sont également des physiciens de premier plan. En résumé, l'apport des théoriciens étrangers à la Grande-Bretagne est considérable, que ce soit d'un point de vue quantitatif ou qualitatif. Au contraire, celui apporté à la France reste beaucoup plus modeste sur les deux plans, et n'a pas permis d'enclencher une dynamique qui aurait pu conduire à la communauté des théoriciens locaux de davantage s'intégrer à celle des théoriciens internationaux.

Pourtant, au moment de la création de la mécanique quantique en 1925, la communauté française partait sur des bases qui étaient certes moins élevées que celle de la Grande-Bretagne, mais qui restaient comparables. En effet, les Britanniques qui ont directement contribué au développement des théories quantiques dans cette première phase sont peu nombreux : P.A.M. Dirac, G.C. Darwin, auxquels on peut peut-être ajouter P.M.S. Blackett (qui est cependant un expérimentateur, mais avec la particularité de suivre de très près les développements théoriques, soit un profil d'expérimentateurs qu'on retrouve difficilement en France) et Fowler (qui joua un rôle important dans la coordination des développements quantiques britanniques), soit donc une population presque aussi modeste que celle des contributeurs français (Louis de Broglie, Léon Brillouin, Edmond Bauer).

Si, en outre, nous regardons la qualité des physiciens nationaux, nous pouvons faire les remarques suivantes : tous deux prix Nobel de physique, Dirac et Mott sont des physiciens de tout premier plan. Le premier est unanimement considéré comme un des plus grands physiciens du XX<sup>e</sup>

---

<sup>302</sup> Voir Datzef (1988).

<sup>303</sup> Voir Hoch (1983).

<sup>304</sup> Heitler (1936).

<sup>305</sup> Notamment ce qui est aujourd'hui appelé le formalisme de Duffin–Kemmer–Petiau.

siècle, et le second a fait de Bristol l'un des tous premiers centres mondiaux de la physique du solide. Nous avons également, de l'autre côté de la Manche, deux théoriciens de réputation internationale avec les noms de Louis de Broglie et de Léon Brillouin, même si le prestige du premier sera quelque fois remis en question (de Broglie restera pour une grande partie de la communauté mondiale des physiciens comme l'homme d'une seule découverte, alors que Dirac a fait un nombre assez impressionnant de percées décisives) et que le second, également l'un des grands initiateurs de la théorie quantique des solides, ne sera jamais récompensé par le prix Nobel. Par ailleurs, les deux communautés peuvent s'enorgueillir de posséder des physiciens de qualité ayant également laissé quelques traces au sein de la physique théorique du XX<sup>e</sup> siècle : par exemple Alexandre Proca (équation de Proca) et Gérard Petiau (formalisme de Duffin–Kemmer–Petiau) d'un côté et Hartree (approximation Hartree-Fock) de l'autre.

Mais d'avantage que la qualité des théoriciens, la principale différence semble avoir été le dynamisme des *leaders* de la communauté britannique, notamment Darwin et Fowler, ainsi que leur position institutionnelle, comparée à la passivité de ceux de la communauté française, de Broglie et Brillouin, et à leur ascension institutionnelle tardive, dans la volonté et la capacité de faire évoluer certaines inerties pourtant bien présentes dans les deux pays. Arrivé à Cambridge au sortir de la seconde guerre mondiale, Darwin se plaint à Bohr de l'état désastreux dans laquelle s'y trouvait la physique :

« What did you think [of] J.J. [Thompson] in April *Phil[osophical] Mag[azine]*. I felt I wanted to shake him. It seems to disregard everything that has been done since about 1900. I am extraordinarily glad that Rutherford is coming here, as really it seems to me that physics and applied mathematics here are in an awful state. I am doing my inadequate best to talk to people quanta : everybody accepts them here now (which is better than it was in 1914 at any rate), but I don't think most of them realize their fundamental importance or have studied the arguments in connection with them<sup>306</sup>... »

Darwin fit ainsi tout ce qu'il pouvait pour faire évoluer les choses, ce qui passa par la mise en place d'un enseignement, en collaboration avec W. Aston, d'un cours optionnel sur la théorie des quanta en dernière année des *Mathematical Tripos* dès le début des années 1920.

Fowler fut quant à lui dès les premiers développements de la mécanique quantique la personne qui permit à la Grande-Bretagne de rester en contact avec les avancées les plus récentes qui se produisaient sur le continent, notamment grâce à son travail de communication et de traduction des articles étrangers<sup>307</sup>. Mentor du jeune Dirac, il enseigna la théorie des quanta à Cambridge à partir de 1922. Plus orienté vers les applications que son collègue Darwin, il occupa un rôle majeur dans la formation d'un groupe de physiciens, incluant J. Lenard-Jones, D.R. Hartree et C.A. Coulson, qui développèrent par la suite une véritable école de chimie quantique en Grande-Bretagne<sup>308</sup>.

Enfin, une dernière différence qualitative peut être mesurée assez objectivement : il s'agit de l'ouverture et de la mobilité de ces chercheurs. Ce critère est souvent le corollaire de l'ouverture du pays aux physiciens étrangers, et nous nous attendons donc à constater un avantage du côté

<sup>306</sup> Cité dans Navarro (2009), p. 318

<sup>307</sup> C'est lui qui communiqua, et sans doute traduisit, par exemple, un article de Louis de Broglie sur la dualité onde-corpuscule (de Broglie (1924-B)), et qui fit connaître à G.P. Thomsom la théorie ondulatoire de l'électron. Voir Navarro (2010). C'est également par son intermédiaire que Paul Dirac prit connaissance des travaux de Heisenberg en 1925.

<sup>308</sup> Gavroglu, Simoes (2002).

britannique. Une unique mais très significative donnée permet de se faire une idée assez précise de ce critère : il s'agit du nombre de physiciens ayant effectué des séjours à Copenhague. Il s'élève au cours des années 1920 à 6 pour la Grande-Bretagne (Darwin, Dirac, Fowler, Hartree, Mott, Thomas, soit 6 physiciens de Cambridge ; on peut une nouvelle fois déceler les liens qui existent entre Bohr d'un côté et Darwin et Rutherford de l'autre) et aucun pour la France<sup>309</sup>. Seuls à ma connaissance Léon Brillouin, Jacques Solomon et Alexandre Proca voyageront à Copenhague côté français dans les années 1930. En revanche, l'entourage de Louis de Broglie - qui pèse presque pour la moitié des physiciens français de la communauté que nous avons dégagée - sera caractérisé par une absence d'ouverture sur le monde. Nous reviendrons sur cet aspect.

Même si on observe une croissance de ces deux communautés dès le début des années 1930, la création de l'Institut Henri Poincaré en France ne suffit pas à permettre aux Français de rivaliser avec le dynamisme anglais porté par l'activisme de Fowler et Darwin, par une plus grande ouverture au monde et par l'apport des physiciens étrangers.

#### b) Usages de la mécanique quantique : une tentative de comparaison avec la Grande-Bretagne

J'entreprends maintenant d'évaluer les poids respectifs en France et en Grande-Bretagne que l'usage de la mécanique quantique prend par rapport à la production totale des physiciens. Il s'agira donc dans un premier temps de savoir dans quelle proportion le formalisme quantique devient une composante essentielle du travail des physiciens dans chaque pays. J'entreprends ici pour la mécanique quantique le type d'études que j'avais tenté au premier chapitre pour la physique dans son ensemble.

Une précision doit être rappelée : les théories quantiques sont beaucoup plus vieilles que la mécanique quantique. Par théorie quantique, j'entends simplement les théories dans lesquelles la constante de Planck  $h$  apparaît. Or, comme nous l'avons vu au premier chapitre, ces théories ont très tôt été intégrées aux travaux des expérimentateurs, du fait de leur caractère parfois très phénoménologique et leur simplicité formelle. Cela a visiblement moins été le cas en ce qui concerne la mécanique quantique. Je distingue donc bien dans cette étude l'usage de la mécanique quantique (qu'elle soit sous la forme ondulatoire, matricielle où n'importe quelle autre forme) et l'usage de quelques formules quantiques à caractère phénoménologiques. Par exemple, la formule  $E=h\nu$  apparaît dans un grand nombre de travaux de spectroscopistes sans qu'il n'y ait jamais un véritable usage du formalisme quantique. Je propose donc de définir un travail qui fait usage de la mécanique quantique comme celui dans lequel sont mobilisés des éléments spécifiques du formalisme quantique, comme la fonction d'onde (ou le vecteur d'état) ou les opérateurs quantiques, ou à défaut lorsque les arguments avancés dans l'article font explicitement référence à ces éléments. Bien sûr, quelques cas seront ambigus et le choix de les intégrer ou non parmi les articles faisant usage de la mécanique quantique sera assez subjectif, mais le classement est en réalité assez aisé – beaucoup plus que ne l'étaient ceux du premier chapitre - dans la plupart des cas.

Ce classement nous permettra ainsi de savoir dans quels types d'études la mécanique quantique est utilisée de manière préférentielle dans chaque pays. Pour la lecture du tableau, les premiers chiffres représentent le nombre total d'articles et les chiffres entre parenthèses le pourcentage

---

<sup>309</sup> Kragh (1999), p. 160.



par rapport au nombre total d'articles quantiques. Les trois dernières lignes indiquent respectivement le nombre total d'articles de physique dans ces deux journaux pour les périodes étudiées, le nombre total d'articles de nature théorique et enfin le nombre total d'articles quantiques. Les *PRS* étant beaucoup plus denses que le *Journal de Physique*, cette étude porte, pour chaque colonne, sur trois années du *Journal de Physique* pour une année des *PRS* (pour le *Journal de Physique*, pour 1927, lire donc 1926, 1927, et 1928, même chose pour 1934 et 1939). C'est donc uniquement les pourcentages (chiffres entre parenthèses) qui nous intéressent ici. Voici donc comment se présentent les résultats :

		1927		1934		1939	
Rubriques	Sous-rubriques	JP	PRS	JP	PRS	JP	PRS
Développement d'un cadre théorique	Physique quantique	7 (88)	3 (33)	9 (26)	3 (13)	9 (45)	0
Travaux à visée essentiellement mathématique		0	0	1 (3)	0	0	0
Travaux à visée épistémologique		0	0	1 (3)	0	3 (15)	0
Modélisation de la matière	Solide	1 (12)	0	5 (15)	6 (25)	0	3 (14)
	Liquide	0	0	0	0	1 (5)	0
	Gaz	0	0	0	1 (4)	0	0
	Autre	0	0	0	1 (4)	0	1 (5)
	Total	1 (12)	0	5 (15)	8 (33)	1 (5)	4 (24)
Physique de l'atome		0	3 (33)	6 (18)	2 (8)	0	2 (10)
Physique moléculaire		0	1 (11)	2 (6)	4 (16)	0	4 (19)

Physique du noyau et radioactivité		0	0	3 (9)	0	2 (10)	0
Physique des particules élémentaires et des interactions fondamentales  (Formulation/Application)	Électrodynamique	0	2 (22)	1 (3)	2 (8)	1 (5)	3 (14)
		0	0	1 (3)	1 (4)	0	0
	Particules	0	0	0	3 (12)	0	2 (10)
		0	0	5 (15)	1 (4)	0	2 (10)
	Gravitation	0	0	0	0	1 (5)	0
		0	0	0	0	0	0
	Total	0	2 (22)	1 (3)	5 (21)	2 (10)	6 (30)
		0	0	6 (18)	2 (8)	0	2 (10)
Totaux	Total	8	9	34	24	17	17
	(pourcentage par rapport au nombre total d'articles de physique)	(8)	(6)	(19)	(14)	(9)	(12)
	Nombre total théorie	18	30	63	43	61	44
	Nombre total physique	95	149	183	177	189	141

Premier constat surprenant, les physiciens britanniques ne semblent, en moyenne, pas plus faire usage de la mécanique quantique que les physiciens français. Le pourcentage des travaux utilisant la mécanique quantique est même en Grande-Bretagne - mis à part à la fin des années 1930 - toujours inférieur à celui des Français. Les taux de cette utilisation restent cependant assez comparables, et les différences de modalités de publications entre les deux pays empêchent de pouvoir conclure sur la

réelle signification de ces petites différences. (Nous avons vu dans la section précédente que la communauté quantique avait plus de poids absolu en Grande-Bretagne qu'en France. Ceci n'est bien sûr pas forcément contradictoire avec la constatation que nous venons de faire, puisque dans le calcul du poids relatif des publications, il faut également prendre en compte le nombre total de physiciens ainsi que la productivité de chacun.) Cette donnée me semble pouvoir indiquer cependant qu'on a, dans la littérature disponible sur ce sujet, peut-être eu tendance à surestimer les obstacles qu'a dû franchir la mécanique quantique pour se diffuser dans la pratique des physiciens français. Non pas qu'elle n'en a pas rencontrés. La mécanique quantique ne s'est par exemple pas du tout diffusée dans le travail des physiciens français qui ont débuté leur carrière avant son apparition. Si on met à part Louis de Broglie et Léon Brillouin, qui jouent en quelque sorte le rôle de tampons entre deux générations, les seuls à en faire usage dans les années 1930 sont des nouveaux venus dans le monde de la Physique. Au fond, ce que nous indique peut-être cette étude, c'est le fait que les pays dans lesquels la mécanique quantique s'est le plus facilement diffusée sont ceux qui ont connu, durant cette période, le plus grand taux de renouvellement générationnel<sup>310</sup>.

Dans leur travail sur la diffusion de la mécanique quantique dans les différents pays scientifiques dans les toutes premières années de son émergence (1925-1927), Kojevnikov et Novik établissent également la faiblesse de la France *et* de la Grande-Bretagne par rapport à des pays comme les Etats-Unis et l'URSS :

« However, despite a large amount of publication in British journals, we cannot speak about the national scientific community in QM<sup>311</sup> there. In Britain, and also in France, QM did not spread very quickly. The contribution of these countries consists of the works of few scientists, like Dirac, Brillouin, de Broglie, of very high qualification and productivity, working, however, almost in solitude.

Just the opposite reception found QM in the USA and the URSS. In these countries the national scientific community in physics was just in the process of formation, and it was much receptive to new ideas and theories<sup>312</sup>. »

Cette hypothèse du facteur générationnel, qui paraît hautement crédible à la lecture des noms des auteurs utilisant la mécanique quantique dans le *Journal de Physique* ou dans les *PRS* — presque toujours issus des jeunes générations — et qui est également largement corroborée par l'étude de l'émergence de la physique théorique aux États-Unis entreprise par Sam Schweber<sup>313</sup>, peut laisser penser que, si des auteurs comme Dominique Pestre ont pu avoir des jugements aussi sévères sur la réception de la mécanique quantique en France, c'est avant tout — mais certes pas uniquement — parce qu'ils ont pris comme objet de comparaison les États-Unis (soit un pays en position de réception, mais possédant une sociologie de scientifiques extrêmement spécifique à cette période) et les pays d'Europe centrale (soit les pays en position « d'émission » de la théorie). Est-ce que cela veut dire que le cas de la réception française de la mécanique quantique n'a rien de particulier ? Tels ne sont évidemment pas

<sup>310</sup> À cet égard, les pertes humaines lors de la première guerre mondiale ont sans doute joué un rôle assez important.

<sup>311</sup> On rappelle que l'étude porte uniquement sur les années 1925-1927. Notre propre étude présentée dans la section précédente semble indiquer qu'une telle communauté prendra forme dans les années 1930, notamment grâce à l'énorme apport de physiciens étrangers -venant des pays d'Europe centrale, d'Europe de l'Est, ou des anciennes colonies - de très grandes valeurs.

<sup>312</sup> Kojevnikov, Novik (1989), p. 131.

<sup>313</sup> Schweber (1986). Dans ce texte, Schweber dégage en effet d'avantage de différences entre les dynamiques des communautés théoriques américaines et européennes, qu'entre les différentes communautés européennes entre-elles.

mes propos. D'une part, nous avons vu dans la section précédente que malgré tout, la Grande-Bretagne deviendra une Terre d'accueil, et le lieu de vie d'une communauté de physiciens quantistes autrement plus importante que ne l'a été la France pendant la période des années 1930. D'autre part, il y a une différence qualitative, entre ces deux pays, dans l'intérêt accordé à la nouvelle théorie. C'est ce que nous allons à présent entreprendre de dégager à partir de nos données.

Une première remarque semble devoir être faite : le nombre d'articles étant en jeu dans certaines rubriques est souvent trop faible pour que le résultat soit significatif. Ainsi, nous pouvons noter que les Britanniques usent davantage de la mécanique quantique dans des applications dans le domaine de la physique moléculaire, alors que les Français ont plutôt tendance à s'en servir pour modéliser le noyau, mais il ne semble pas que l'on puisse en tirer des affirmations solides, d'autant plus qu'une lecture de la littérature secondaire concernant la réception de la mécanique quantique en Grande-Bretagne nous apprend que cette dernière joua un rôle absolument majeur dans les avancées sans précédent que réalisèrent les membres du laboratoire Cavendish durant la fin des années 1920 et le début des années 1930 dans le domaine de la physique nucléaire<sup>314</sup>. Cette appellation générique de « physique nucléaire » incorpore certes à l'époque une partie de ce que nous appelons désormais « la physique des particules », mais pas uniquement. Par exemple, Hughes signale que les travaux de Georges Gamow portant sur la modélisation quantique de la désintégration  $\alpha$  en 1928, et qui concerne donc bien la physique du noyau « furent cruciaux pour la transformation des travaux de recherche expérimentale nucléaire dans le Laboratoire Cavendish<sup>315</sup> ». Dans un contexte marqué par une nette coupure entre deux traditions de recherche en physique, « celle de Cavendish, basée sur la physique expérimentale des décharges dans les gaz et des ions d'un côté, et celle, plus traditionnelle basée sur les *Mathematics Tripos* de l'autre », l'avènement des théories quantiques du noyau marque, selon Hughes, et particulièrement à Cambridge, « un tournant fondamental dans les relations entre les expérimentalistes et les théoriciens en « physique nucléaire », un domaine caractérisé par une division du travail entre expérimentalistes et théoriciens et un ensemble de présupposés épistémologiques très différents de ceux qui caractérisaient son prédécesseur, la radioactivité »<sup>316</sup>.

En réalité, un autre choix d'années de recensement aurait permis aux résultats de notre étude d'être plus cohérents avec ce que nous savons par ailleurs des travaux britanniques en physique nucléaire. Par exemple, le compte rendu d'une discussion à la *Royal Society* entre expérimentateurs et théoriciens (Rutherford, Chadwick, Aston, Ellis, Gamow, Fowler, Richardson et Hartree), et dans laquelle Fowler s'applique « à décrire [pour l'audience] quelle aide la nouvelle théorie quantique peut apporter dans la discussion de la structure et des propriétés du noyau »<sup>317</sup>, reflète sans doute bien ces fructueux échanges qui se mettent en place à la fin de cette décennie dans la physique nucléaire en Grande-Bretagne. Par ailleurs, une dizaine d'articles (écrits notamment par Massey, Mott ou encore Fowler) présentant une application de la mécanique quantique au noyau peuvent être trouvés dans les *PRS* au cours des années 1929 et 1930, ce qui tend à prouver qu'en choisissant 1934 et 1939, nous

---

<sup>314</sup> Hughes (1998).

<sup>315</sup> *Ibid.* p. 350. J'ai moi-même traduit de l'anglais.

<sup>316</sup> *Ibid.* p. 342.

<sup>317</sup> Rutherford *et al.* (1929).

sommes tombés sur des années particulièrement creuses en ce qui concerne ce type de développement en Grande-Bretagne.

Les différences au sujet de la physique des interactions fondamentales et des particules élémentaires, que ce soit au niveau des applications concrètes ou des développements théoriques plus généraux, ne semblent pas, là non plus, très significatives.

Il faudra cependant examiner plus loin ces derniers types de travaux de plus près, car ils constituent un remarquable révélateur de la manière dont les physiciens comprennent fondamentalement la mécanique quantique : ce sont en effet des théories considérées comme « fondamentales », qui constituent des pierres de touche pour l'utilisation de la mécanique quantique. Le choix d'utiliser tel ou tel cadre théorique quantique (la théorie quantique des champs ou la mécanique ondulatoire poly-dimensionnelle par exemple) peut en effet indiquer pour chaque physicien ce qui, selon lui, constitue l'essence du formalisme quantique.

J'en viens maintenant à ce qui constitue, d'après les données du tableau, les différences significatives dans l'utilisation de la mécanique quantique par les deux communautés de physiciens. Ce qui est frappant est l'énorme importance, qui ne se dément d'ailleurs jamais, pris par les développements des cadres théoriques quantiques généraux en France. Bien entendu, c'est au moment de la parution de nouvelles théories que ce genre de discussions prend le plus de volume, ce qui se confirme ici que ce soit en France (88%) ou en Grande-Bretagne (33%) : cela signifie simplement qu'avant de songer plus sérieusement à toutes les applications possibles du nouveau cadre, il faut en discuter les fondements et le parfaire. En revanche, les Britanniques vont très vite délaisser ce genre de travaux (13% en 1934 et 0 en 1939), contrairement aux Français qui continueront à y consacrer une majorité relative de leurs publications (26% en 1934 et 45% en 1939). Ajoutons également que les Français consacrent également quelques articles à des discussions d'ordre épistémologique ou philosophique, ce qui confirme la tendance des Français à s'intéresser à des problèmes très généraux.

La rubrique qui obtient la majorité relative des publications côté Grande-Bretagne est la modélisation de la matière (c'est-à-dire des objets physiques qui sont constitués d'un nombre macroscopique de particules). Ce n'est guère surprenant : nous savons par exemple que Bristol deviendra un des hauts lieux mondiaux de la physique du solide.

En définitive, cette étude semble relever une certaine tendance chez les Français à privilégier les études théoriques générales plutôt que celles portant sur des objets physiques bien particuliers. Elle corrobore les impressions exprimées par certains physiciens qui ont commencé leur carrière scientifique avant ou juste après la seconde guerre mondiale. Celui qui a explicité ce climat avec sans doute le plus de force est Anatole Abragam, tout jeune physicien qui oscille encore dans les années 1930 entre la volonté de se spécialiser en physique théorique et la perspective d'opter pour une carrière d'expérimentateur<sup>318</sup>. Il sera inscrit en doctorat pendant trois ans sous la direction de Francis Perrin, trois ans qu'il consacra à des recherches portant sur... le choix de son sujet de thèse. Guère soucieux de diriger ses travaux, Francis Perrin se contente de signer tous les ans son renouvellement d'inscription en doctorat. Abragam fera alors le tour de la communauté des physiciens théoriciens, à commencer par le séminaire Louis de Broglie dominé par les travaux très abstraits de Jean-Louis Destouches. Quelques séances suffiront à le dégoûter d'une manière de faire de la physique théorique, qui consiste selon lui essentiellement en une herméneutique de la mécanique ondulatoire, par contraste avec son ambition d'utiliser cette théorie comme un outil de recherche.

---

<sup>318</sup> Abragam (1987).

Cette situation semble se prolonger jusqu'aux débuts des années 1950, comme l'attestent un certain nombre de témoignages de physiciens qui ont côtoyé la physique théorique française jusqu'à cette période. Ainsi Victor F. Weisskopf, qui passe l'année universitaire 1950-1951 en France, décrit la communauté des théoriciens en ces termes :

« Activities in theoretical physics at the Sorbonne are led by Louis de Broglie who has assembled a group of theorists whose principal members are Professor J.L. Destouches, J. Courtois, B. Kwal, C. Morette<sup>319</sup>, G. Petiau, M. Tonnelat and J. Winter. The interest of this group is concentrated upon **fundamental question** such as the theory of elementary particles, quantum electrodynamics and field theory. The weekly seminar of Professor de Broglie at the Institut Henri Poincaré is an important meeting place for the theorists in Paris. There is also a group of young people at the Institut Poincaré who work under guidance of Dr. Proca on problems in field theory. **The research which is done by these groups is of rather abstract character and perhaps too much of the formal mathematical type.** It is unfortunate that the work of the theorists at the Institut Poincaré does not have more relation with the experimental work in the many laboratories of neighborhood »<sup>320</sup>.

Là encore nous pouvons nous poser la question de savoir si la sévérité de ces deux derniers jugements n'est pas amplifiée par le point de vue depuis lequel ces deux auteurs regardent la scène qu'ils décrivent. Abragam porte un jugement rétrospectif, à une période à laquelle les traditions de recherches en France, mais aussi partout en Europe, ont largement évolué. Quant à Weisskopf, il travaillait à cette période aux Etats-Unis, pays dans lequel, comme nous l'avons vu, la séparation institutionnelle entre théoriciens et expérimentateurs est beaucoup plus lâche qu'en Europe. En revanche, nous pouvons tout de même remarquer que ce dernier a beaucoup voyagé et est familier avec suffisamment de centres de physique théorique pour pouvoir émettre un jugement informé sur les caractéristiques de chacun. Si la Grande-Bretagne présente sans aucun doute des situations très différentes en fonction des groupes de physiciens, il n'en reste pas moins vrai que certains de ses thèmes de recherche privilégiés favorisent une plus grande intégration des considérations expérimentales chez les physiciens quantistes. C'est notamment le cas chez les physiciens du solide à Bristol. Jacques Friedel y décrit dans sa biographie un groupe très actif de physiciens théoriciens regroupés autour de Froehlich, Zener, Jones et Mott, qui travaillent dans une ambiance caractéristique de la physique de laboratoire, avec des échanges fructueux entre théoriciens et expérimentateurs, comme l'atteste l'anecdote suivante :

« Charles Frank décrit en détail les formes spiralées que doivent prendre, d'après ses calculs avec W.K. Burton et N. Cabrera, les faces de croissance lente de cristaux, au débouché des lignes de dislocation qu'elles contiennent ; quelqu'un se lève alors dans l'assistance pour projeter des spirales de croissance de forme identique qu'il venait d'observer sur le quartz et ne s'expliquait pas. Cet incident,

---

<sup>319</sup> Cécile Morette est également comptée par Louis de Broglie dans un rapport sur l'activité de l'Institut Henri Poincaré parmi les élèves de J.L. Destouches (42J/Boîte 40). Si elle a bien assisté à ses cours à la Sorbonne, et si Louis de Broglie était officiellement son directeur de thèse, celle-ci m'a en revanche indiqué lors d'un entretien qu'elle n'a jamais eu de réelles interactions scientifiques avec le groupe de Louis de Broglie (Morette-De Witt (2011)).

<sup>320</sup> Weisskopf (1951), pp. 6-11. C'est moi qui souligne. En revanche, Weisskopf note la formation d'un petit groupe de théoriciens qui émerge à la même période du côté de Saclay, beaucoup plus porté sur « the theoretical background of the experimental work of the laboratory », et qui regroupe des physiciens comme J. Yvon, A. Abraham, J. Horowitz, C. Mercier, M. Trocheris ou encore P. Meyer. p. 11. Nous reviendrons sur ce point dans la seconde partie de ce travail.



qui m'impressionna à l'époque, caractérise bien l'atmosphère qui régnait alors à Bristol, faite d'enthousiasme et de confiance dans une recherche qui se remettait en marche<sup>321</sup> ».

Cette ambiance de laboratoire est également celle qui prévaut à Cambridge, où se met en place, vers la fin des années 1920, un petit groupe de théoriciens qui collaborent massivement avec leurs collègues expérimentateurs au point de complètement changer leurs pratiques<sup>322</sup>. Ainsi, pour Blackett en 1933, même les expérimentateurs doivent savoir que « quand deux particules identiques collisionnent, les choses les plus étranges arrivent, qui ne peuvent s'expliquer ni par le concept d'onde ni par celui de corpuscule, à moins que l'expérimentateur ne soit prêt à suivre ces concepts dans un espace à six dimensions »<sup>323</sup>. J'ai pu également constater à la lecture de certains articles dans les *PRS* que c'était aussi le cas à l'université Saint Andrew, en Ecosse, où des articles (dont Arnot est chaque fois un des co-auteurs) mélangeant développements théoriques mobilisant le formalisme quantique et présentations de résultats expérimentaux obtenus par l'un des deux co-auteurs, sont écrits.

Or, ce genre d'articles est extrêmement rare en France à cette période, pour ne pas dire inexistant. Non pas qu'il s'agisse d'un refus net, ni d'un scepticisme complet envers toute notion quantique. Par exemple, Frédéric Joliot et Irène Curie, dans un texte écrit à l'occasion du jubilé de Louis de Broglie en 1953, reconnaissent et décrivent par le menu tout l'apport que la mécanique ondulatoire a fourni à la physique nucléaire<sup>324</sup>. Ils indiquent par ailleurs, qu'ils connaissaient la thèse de Louis de Broglie 1925 et 1926, et qu'ils suivaient au Collège de France les cours de Paul Langevin sur l'identité entre la mécanique des matrices et la mécanique ondulatoire. Pourtant, l'apport que la mécanique ondulatoire a eu sur leurs propres travaux n'apparaît pas clairement à la lecture de ce texte, et encore moins à la lecture de leurs articles. Encore à la fin des années 1940, Frédéric Joliot engagea Cécile Morette pour accomplir la mission d'informer les membres du laboratoire sur les publications théoriques, visiblement alors un des grands angles morts de la vie intellectuelle du laboratoire, mission que Cécile Morette était alors incapable s'assumer, faute d'une formation théorique suffisante<sup>325</sup>.

On peut faire la conjecture selon laquelle la méthodologie de recherche des Joliot-Curie ne nécessitait pas une prise en compte profonde de l'outillage conceptuel de la mécanique quantique. Une même chose peut être dite par exemple d'Alfred Kastler, qui enseignait encore après-guerre la physique atomique à l'ENS avec une approche semi-classique très phénoménologique (les notions de spin, de nombre quantique..., étaient introduites sans jamais faire référence au formalisme de la mécanique quantique<sup>326</sup>), de Louis Néel, qui opposa à la fin des années 1950 un refus poli mais ferme aux projets de collaboration que venait lui proposer Jacques Friedel, arguant du fait qu'il n'avait pas besoin de théoriciens et que la mécanique quantique apportait des complications inutiles dans le domaine du magnétisme<sup>327</sup>, ou encore d'Yves Rocard, qui s'enorgueillissait durant les années 1930 d'expliquer l'effet Raman sur des bases théoriques purement classiques, prouvant ainsi que la bonne vieille physique classique était largement suffisante pour un ensemble d'applications encore très

---

<sup>321</sup> Friedel (1994), p. 170.

<sup>322</sup> Voir plus haut.

<sup>323</sup> Blackett (1933), pp. 67-96. Blackett fait référence à deux aspects fondamentaux de la description quantique des systèmes de corpuscules identiques : leur indiscernabilité et la propagation de la fonction d'onde de l'ensemble du système dans un espace multidimensionnel.

<sup>324</sup> Joliot-Curie (1953).

<sup>325</sup> Morette-Dewitt (2011). Celle-ci acquerra une telle compétence lorsqu'elle partira de France. Concernant le laboratoire de Joliot, nous verrons que des théoriciens commencent à y travailler à partir des années 1950.

<sup>326</sup> André Martin (2011).

<sup>327</sup> Friedel (2011). Voir également Friedel (1994), p. 200.

grand<sup>328</sup>. Dans tous ces cas, nous avons affaire à des physiciens pragmatiques qui ne s'embarrassent que très peu avec des considérations philosophiques, qui n'ont jamais manifesté de malaise vis-à-vis des concepts quantiques, et qui n'ont jamais mis en cause sa validité. Il n'y a dans ces cas-là aucun blocage, aucun obstacle vis-à-vis des théories quantiques, il y a simplement la présence de façons de travailler qui ont déjà fait la preuve de leur efficacité et qui ne nécessitent pas la prise en compte de la mécanique quantique.

Ceci ne veut pas dire qu'il n'y a eu aucun scepticisme vis-à-vis de la validité de la mécanique quantique, mais il faut bien avouer que celui-ci est difficilement constatable dans la littérature publiée. Maurice Lévy<sup>329</sup> affirme cependant que ce scepticisme existait à la Sorbonne chez les vieux professeurs jusqu'à la fin des années 1940 et encore au début des années 1950 lors de son passage à Bordeaux. Il semble néanmoins que ce scepticisme n'était pas de mise dans les milieux scientifiques qui étaient un tant soit peu informés des données de la microphysique.

### c) Conclusion

Nous pouvons dégager à partir de ces deux études, dont les résultats sont complétés par un certain nombre de témoignages, trois principales conjectures :

-Sans doute dû à une relative faiblesse d'ensemble de la physique française (du moins sur un plan quantitatif), mais également à un manque d'attractivité et à une certaine fermeture vis-à-vis de l'étranger, la communauté des physiciens quantistes ne parvient pas à atteindre un poids critique à partir duquel pourrait se lancer une véritable dynamique institutionnelle et une diversification dans l'utilisation de ce formalisme. Par ailleurs, l'exemple de la façon dont les pratiques de recherche ont évolué à Cambridge après le remplacement de J.J. Thomson et l'arrivée de Rutherford, Darwin et Fowler montre que l'activisme d'une poignée de physiciens peut drastiquement changer la donne : cette étude comparative pose donc la question de l'incapacité de Brillouin et de Broglie à avoir fédéré une école de recherche attractive.

-Ce n'est pas nécessairement un refus de la théorie en elle-même qui semble être en cause. Les physiciens quantistes de France accèdent facilement aux espaces de publications, comme en témoigne le fait que le taux de travaux quantiques est légèrement plus élevé dans le *Journal de Physique et le Radium*<sup>330</sup> que dans les *PRS*. Par ailleurs, nous savons qu'ils n'ont également aucun mal à accéder à l'autre mode principal de publication en France, les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*. Il suffit généralement pour cela de transmettre l'article par l'intermédiaire de Louis de Broglie, membre de l'Académie, qui ne fait généralement pas obstacles à sa publication (quant bien même il ne porte aucun intérêt à l'article, d'après le témoignage d'Elsasser<sup>331</sup>). En revanche est sans doute en cause la faiblesse de nombre de postes disponibles accordés à la physique théorique, ainsi qu'une absence de volonté pour certains physiciens importants d'intégrer de nouvelles méthodologies de recherche, ce

---

<sup>328</sup> Rocard (1988).

<sup>329</sup> Lévy (2011).

<sup>330</sup> On peut objecter que l'accès à ce journal est facilité par le fait que le comité éditorial est composé de proches de Paul Langevin, c'est-à-dire par des physiciens tout à fait favorables aux nouvelles théories physiques. On peut cependant répondre que le fait que ce soient des physiciens favorables aux nouvelles théories physiques qui sont aux commandes de la principale revue de physique en France n'est pas forcément un signe que ces théories sont rejetées par « l'appareil » français.

<sup>331</sup> Elsasser (1978), p. 187.

qui ne correspond pas tant à un refus épidermique du théorique qu'à une volonté de conservation des habitudes de recherche françaises par les physiciens de la génération au pouvoir.

- Enfin, les travaux quantiques français sont caractérisés par leur nature très abstraite et générale, et par leur manque de contact avec les résultats et les travaux expérimentaux. C'est donc également la manière de s'approprier la mécanique quantique, plutôt que simplement la question de savoir si elle a été acceptée ou pas, qui est en cause ici. Nous allons, dans la section qui suit, entrer dans une discussion plus approfondie sur ce point en regardant plus précisément le contenu des publications françaises.

## 2- Une analyse de la production des principaux théoriciens français (1925-1940)

Je vais dans cette section tenter de dégager plus précisément les caractéristiques des travaux quantiques français. Comme il n'est ici pas question d'étudier en profondeur la totalité des articles disponibles, je devrai procéder à des choix, qui ne manqueront pas de contenir quelques éléments arbitraires. Néanmoins, je tâcherai au mieux de choisir les travaux les plus représentatifs des physiciens les plus productifs dans le paysage théorique français. Pour ce faire, je me restreindrai dans cette section à discuter uniquement des théoriciens qui ont utilisé le formalisme quantique dans au moins 3 articles<sup>332</sup> publiés dans le *Journal de Physique*.

J'ai déjà largement présenté les travaux de Louis de Broglie dans la section précédente, et je n'y reviendrai pas. Vient ensuite Léon Brillouin, qui a eu une grande productivité (11 articles) et qui est, après Louis de Broglie, le personnage le plus important de cette communauté, même s'il n'a jamais eu vraiment d'élèves<sup>333</sup>. Puis nous examinerons les travaux de Jacques Solomon qui est également l'un des théoriciens les plus productifs (12 articles), et qui présente un profil bien singulier en France, marqué par une intégration au programme de recherche de la théorie quantique des champs et des interactions étroites avec les physiciens de l'« école de Copenhague »<sup>334</sup>. Parce qu'il fut également un des physiciens les plus productifs (13 articles), et qu'il est considéré par beaucoup de physiciens d'après guerre comme le « représentant », voire « le père » de « l'école internationale » de physique théorique française – en opposition avec Louis de Broglie, qui fut lui le représentant de l'école de « la théorie française repliée sur elle-même » - nous examinerons de près l'œuvre d'Alexandre Proca. Nous présenterons plus succinctement l'œuvre de Louis Goldstein, dont la carrière fut courte mais très intense (15 articles), et également celle du seul étranger de notre liste, Walter Elsasser, qui fut le principal contributeur à la physique théorique française du noyau. Enfin, nous

---

<sup>332</sup> Ce nombre n'a rien de particulier, mais cela permet de sélectionner les théoriciens qui font un usage régulier de la mécanique quantique dans leurs travaux. S'il peut paraître faible, il ne faut pas oublier que le journal dans lequel les physiciens français publient le plus reste les *Comptes Rendus*.

<sup>333</sup> Nous savons qu'il eut néanmoins comme collaborateur Jean Mariani, et qu'il avait également des interactions scientifiques et amicales avec Alexandre Proca, comme en atteste leur correspondance, ou encore avec Jacques Solomon, dont il dirigea la thèse (selon Bustamente (1997)), et enfin Jacques Winter. Cependant, il ne sembla jamais intéressé par la formation d'un groupe d'élèves. Certains ont évoqué pour expliquer cela des raisons purement institutionnelles – son élection au Collège de France, qui ne favorisait pas la formation d'un tel groupe d'élèves (c'est plus ou moins ce qu'avance Remy Mosseri (1999) dans sa biographie de Brillouin), mais, d'une part, on peut douter que ce facteur ait vraiment été contraignant, et, d'autre part, le témoignage d'Abraham (1989) et de Ullmo (1963) plaident plutôt pour le fait qu'il n'en a jamais eu vraiment la volonté.

<sup>334</sup> Ami de Léon Rosenfeld, un des plus proches collaborateurs de Niels Bohr, il séjourna à Copenhague auprès de Bohr et à Zurich auprès de Pauli, avec lequel il publia d'ailleurs un article paru dans le *Journal de Physique et le radium*.

étudierons les travaux des plus productifs et des plus influents élèves de Louis de Broglie (c'est-à-dire Jean-Louis Destouches, Gérard Petiau, Bernard Kwal, Jacques Winter).

Comme je l'ai laissé entendre, j'insisterai d'avantage sur le contenu des articles portant sur des sujets fondamentaux que sur ceux relevant d'une application, moins problématique et plus technique de la mécanique quantique à des sujets particuliers. La raison n'en est pas que ce genre de travaux possède moins d'importance : au contraire, un des objectifs de cette section est de dégager les différentes manières de s'approprier la mécanique quantique et de préciser ce que chaque auteur en fait et dans quel but. Mais l'autre objectif de cette analyse est de tenter de décrire la manière dont les théoriciens français comprennent la mécanique quantique, ce qui, pour eux, en constitue l'essence, et le statut qu'ils attribuent à ce cadre théorique. Or, nous verrons que les travaux d'application de la mécanique quantique à des sujets tels que la physique atomique et moléculaire, la théorie des solides ou la théorie du noyau relèvent avant tout de méthodes de calculs assez standardisées pour lesquelles il est inutile de poser la question du statut ou de la validité de la mécanique quantique, dont on ne cherche d'ailleurs pas à faire à chaque étape une application stricte et rigoureuse, l'important étant avant tout l'obtention de résultats (qu'ils soient de nature quantitative ou qualitative) *via* des procédures d'approximations. En bref, ces travaux nous indiquent si l'auteur s'est approprié la mécanique quantique en tant qu'outil théorique de recherche, dans quel but il l'utilise, mais ils n'indiquent souvent pas le sens et le statut donnés à cette théorie. En revanche, les travaux à caractère plus fondamental, portant par exemple sur les particules élémentaires et les interactions entre celles-ci, quand ce ne sont pas des travaux portant sur le cadre théorique lui-même, mettent en exergue beaucoup plus nettement la manière dont l'auteur conçoit la théorie, sa signification et ses éventuelles limites.

Cette section permettra aussi de présenter les membres les plus importants de la communauté des théoriciens français, et les éventuels réseaux et liens intellectuels qu'ils entretiennent entre eux et avec l'étranger. Elle servira enfin de préparation à la discussion de l'influence scientifique de Louis de Broglie au sein de la communauté quantique française. Quelques éléments biographiques, lorsqu'ils sont disponibles, seront ainsi apportés, et nous discuterons aussi succinctement des références bibliographiques que les auteurs insèrent dans leurs publications afin de dégager d'éventuels réseaux intellectuels.

a) Léon Brillouin : de la présentation des nouvelles théories à leur application aux solides

Fils du mathématicien et physicien Marcel Brillouin, Léon Brillouin<sup>335</sup> rentre à l'ENS en 1908, puis passe l'année universitaire 1912-1913 à Munich auprès d'Arnold Sommerfeld, que son père a rencontré un an plus tôt lors du conseil Solvay de 1911. Sous la direction de Sommerfeld, Brillouin travaille sur la propagation des ondes électromagnétiques, puis sur la propagation des ondes en milieu dispersif. Rentré en France, il attaque sa thèse de doctorat sur l'application de la théorie des quanta au solide, sujet initié en 1907 par Einstein et développé par l'ancien collaborateur de Sommerfeld à Munich, Peter Debye. La guerre interrompt ces travaux, mais le met en contact à une physique très appliquée. Mobilisé au Laboratoire Central de la Radiotélégraphie Militaire sous l'autorité du général Ferrié, il y développe notamment en 1915 en compagnie de Maurice de Broglie un amplificateur à résistance. Il fait également connaissance avec Louis de Broglie durant cette période. Il reprend ses travaux de thèse en 1919. Dans celle-ci, suivant les travaux de Debye, il modélise les vibrations des

---

<sup>335</sup> Voir Mosseri (1999) et Darrigol (1989).

solides parfaits en les décomposant en ondes transversales et longitudinales, et démontre notamment que les intensités se répartissent sur chaque onde suivant la loi de Planck du corps noir lorsque le solide est en équilibre thermodynamique avec le rayonnement électromagnétique. Dans la dernière partie de sa thèse, Brillouin étudie la diffusion de la lumière par un solide<sup>336</sup> et parvient à faire la prédiction théorique d'un mode de diffusion inconnu de la lumière par la matière, dans lequel la lumière est diffractée par une onde acoustique du milieu et subit, par effet Doppler, un décalage vers le rouge ou le bleu suivant la direction de la propagation de l'onde acoustique. Ce phénomène, analogue dans son principe à l'effet Raman (découvert en 1928), ne sera vérifié expérimentalement qu'en 1930 et sera baptisé l'*effet Brillouin*.

De 1923 à 1928, Brillouin est directeur adjoint du laboratoire de Langevin au Collège de France, et devient en 1928 titulaire de la chaire de théories physiques nouvellement créée à la Sorbonne à l'occasion de la création de l'Institut Henri Poincaré. Il publie en 1923 un ouvrage important qui fait le point sur ce que l'on appellera par la suite *l'ancienne théorie des quanta*<sup>337</sup> et continue également à s'intéresser, pendant cette période, à la théorie du solide, en introduisant notamment le formalisme tensoriel à l'étude de l'élasticité<sup>338</sup>. Pour récapituler, Brillouin dispose en 1924 de liens solides avec la physique allemande acquis lors de son séjour auprès de Sommerfeld, d'une excellente connaissance de la théorie des quanta, de la théorie des ondes<sup>339</sup>, et de l'algèbre tensoriel – lui donnant une connaissance solide des mathématiques matricielles –, ce qui fait de lui quelqu'un d'exceptionnellement bien adapté à l'arrivée des développements de Heisenberg et Schrödinger. Il n'est donc pas surprenant qu'il fut le premier Français à publier sur ces sujets. Il écrit ainsi, dès Février 1926, alors qu'elle n'a encore que quelques mois, une note aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences*<sup>340</sup> dans laquelle il tente une application aux mouvements de rotation de la nouvelle « méthode » que viennent d'élaborer Heisenberg, Jordan et Born. À ce stade d'élaboration de la mécanique quantique où il n'est pas encore question de « fonction d'onde » ou de « dualité onde-corpuscule »<sup>341</sup>, la théorie se résume à une simple méthode algorithmique consistant à établir la formulation de la matrice Hamiltonienne (en fonction des matrices correspondant aux grandeurs classiques et soumises aux relations de non-commutation) et à la diagonaliser afin d'obtenir les niveaux d'énergie et les spectres d'émission et d'absorption. Brillouin s'emploie à appliquer ces procédures pour un modèle extrêmement simplifié d'objet atomique subissant deux types de mouvements : la rotation et la vibration.

C'est cependant avant tout un rôle de diffuseur, plutôt qu'un rôle de réel contributeur, que Léon Brillouin remplit lors des tous premiers mois qui succèdent à la naissance de la théorie. Dès 1925, devant un petit panel de physiciens apparemment fort étonnés par le nouvel algorithme, il présente pour la première fois en France la mécanique des matrices au Collège de France<sup>342</sup>. Il continue ensuite son œuvre de présentation dans les journaux spécialisés, notamment le *Journal de*

---

<sup>336</sup> Léon Brillouin (1922)

<sup>337</sup> Léon Brillouin (1923).

<sup>338</sup> Léon Brillouin (1924)

<sup>339</sup> On rappelle également que Brillouin fut un des rares physiciens à avoir discuté régulièrement avec Louis de Broglie durant l'élaboration de sa thèse.

<sup>340</sup> Léon Brillouin (1926-A).

<sup>341</sup> Les travaux de Schrödinger ne paraissent dans les *Annalen der Physik* qu'en mars 1926.

<sup>342</sup> Voir Ullmo (1963).



*Physique*, dans lequel il synthétise en avril 1926<sup>343</sup> pour les lecteurs francophones un ensemble de douze contributions sur la nouvelle mécanique parues dans différents journaux européens, parmi lesquelles on retrouve les travaux pionniers de Heisenberg, Born, Jordan, mais également les développements de Dirac et d'autres auteurs comme Wiener, London ou encore Lanczos. Même si son ambition est avant tout « de présenter l'essentiel de ces tentatives, et de raccorder les points de vue souvent très différents adoptés par les auteurs », Léon Brillouin n'hésite cependant pas à adresser quelques remarques critiques et à discuter certains résultats. Et de déclarer à la fin de son article :

« Il faudrait, d'ailleurs, chercher si cette théorie peut se raccorder avec les très intéressantes suggestions de Schrödinger [*Ann. der. Phys.*, t.79 (1926), p 361, et p 489] qui dérivent des idées de L. de Broglie<sup>344</sup> ».

Car tout comme la plupart des physiciens, Léon Brillouin va privilégier le formalisme de la mécanique ondulatoire dès que celui-ci sera disponible et suffisamment développé. On l'a vu, sa connaissance profonde des outils mathématiques permettant le maniement des ondes, acquise durant sa thèse, le dispose à devenir rapidement un spécialiste dans l'utilisation de cette nouvelle théorie. Il fait preuve de cette compétence dès le premier grand article qu'il y consacre et qu'il envoie au *Journal de Physique* en 1926<sup>345</sup>. Ce travail est le premier d'une longue série qui fera de Brillouin un expert dans la création d'outils et de méthodes de résolution des problèmes dans lesquels est appliquée la mécanique ondulatoire<sup>346</sup>. Il s'agit ici de la mise en place de ce qui sera appelée par la suite la méthode BWK (Brillouin-Wentzel-Kramers)<sup>347</sup> : une méthode de résolution de l'équation de Schrödinger par approximation successive, par l'intermédiaire d'un développement en série en  $\frac{h}{2\pi}$  de la phase de la fonction d'onde, qui deviendra un des outils standards<sup>348</sup> de résolution de problèmes à l'approximation semi-classique<sup>349</sup>.

Cependant, quelques remarques sur le sens physique de la théorie permettent de rappeler au lecteur que nous sommes encore dans une phase très précoce du développement de celle-ci, et laissent paraître l'état de perplexité dans lequel pouvaient se trouver les physiciens confrontés à son apparition. Comme il s'agit d'une des rares occasions où Léon Brillouin se préoccupera de questions de fondements de cette théorie, nous pouvons faire ici une brève présentation de ces remarques. Brillouin précise l'origine des conceptions physiques de la mécanique ondulatoire, attribuées à son père, et qui consistaient essentiellement à considérer que « les conditions de quanta peuvent s'interpréter comme dues à la résonance d'une onde spéciale émise par l'électron » qui traduirait l'existence « d'un milieu continu, analytiquement illimité, mais asymptotiquement homogène au loin et qui possède néanmoins des périodes propres caractéristiques bien distinctes les unes des autres ». Or, pour Léon Brillouin la mécanique ondulatoire est justement « venue confirmer ces vues, et préciser le sens de ces ondes

---

<sup>343</sup> Léon Brillouin (1926-B)

<sup>344</sup> Léon Brillouin (1926-B).

<sup>345</sup> Léon Brillouin (1926-C).

<sup>346</sup> En 1932, Brillouin publie un livre sur les méthodes d'approximation en mécanique ondulatoire. (Brillouin (1932-A)).

<sup>347</sup> Cette méthode est découverte de manière indépendante à peu près à la même période par Wentzel, puis développée quelques mois plus tard de manière plus rigoureuse par Kramers.

<sup>348</sup> La méthode BKS est par exemple présentée dans Messiah (1958), p. 194.

<sup>349</sup> C'est-à-dire lorsque l'on est à la limite de l'applicabilité de l'approximation classique de l'équation de Schrödinger (lorsqu'on fait tendre  $h$  vers 0).



hypothétiques ». Malgré cette confirmation, de nombreuses zones d'ombres subsistent pour éclaircir le sens de ce formalisme qui ne semble être, pour Léon Brillouin, qu'à l'état d'ébauche, notamment pour trois raisons :

D'abord, la présence d'un terme imaginaire dans l'équation d'onde de Schrödinger « n'est pas très satisfaisante ».

Ensuite, les fréquences observables  $\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}$  n'apparaissent pas naturellement dans les procédés de calcul de Schrödinger. En effet, on les retrouve seulement dans la construction des matrices de Heisenberg à partir des fonctions d'ondes, en utilisant le conjugué complexe de la fonction d'onde. Par exemple :  $q_{nm} = \int \psi_n^* q \psi_m dq$  et non pas :  $q_{nm} = \int \psi_n q \psi_m dq$ . Or, pour Léon Brillouin, ce choix, qu'il qualifie d'« artifice de calcul », « n'explique rien ».

Enfin, Brillouin avoue qu'il a « peine à admettre [...] la réalité des fréquences  $\frac{E_n}{h}$  ou  $\frac{E_m}{h}$  qui apparaissent dans les fonctions  $\psi_n$  ou  $\psi_m$  » : « on m'explique que ces fréquences sont si élevées qu'elles nous échappent, je croirais plus volontiers que ce ne sont pas des fréquences, et que les fonctions  $\psi$  ne dépendent pas du temps, mais d'une autre variable auxiliaire, que j'appellerai  $\xi$  », et de montrer comment l'introduction de cette nouvelle variable pourrait faire apparaître plus « naturellement » les fréquences de Bohr au sein de la mécanique ondulatoire. À noter qu'une autre façon naturelle d'introduire les fréquences de Bohr au sein de la mécanique ondulatoire était l'interprétation électrodynamique de la fonction d'onde proposée par Schrödinger<sup>350</sup>. Son introduction apparaîtra enfin moins artificielle après un développement cohérent de l'interprétation probabiliste du nouveau formalisme dans le cadre de la théorie des transformations. Mais Brillouin ne fait ici aucune référence à l'une de ces deux interprétations.

Les premiers travaux de Brillouin sont donc ponctués de quelques réserves sur certains aspects « arbitraires » du formalisme, ainsi que sur certaines invraisemblances physiques. Mais l'esprit qui domine reste cependant assez pragmatique : le formalisme y est avant tout présenté comme un algorithme de calcul, auquel il faudrait certes fournir des fondements plus clairs à l'aide de principes physiques plus précis.

L'utilisation ultérieure du formalisme quantique par Brillouin restera dans cette lignée de création d'outils théoriques et d'application à des problèmes concrets. Ces problèmes, il les puisera essentiellement au sein de son ancien thème de prédilection, la théorie des solides, ce qui fera de lui — en compagnie d'Arnold Sommerfeld, Wolfgang Pauli, Félix Bloch, et quelques autres — un des fondateurs de la version quantique de cette branche de la physique théorique qui va connaître d'énormes développements après la seconde guerre mondiale. Dès 1926, Brillouin propose ainsi, indépendamment de Pauli, une théorie quantique du paramagnétisme<sup>351</sup> qui permet de corriger celle, classique, de Langevin, en prenant en compte la quantification des moments magnétiques des électrons. Mais c'est surtout dans l'étude de la dynamique de ces derniers au sein des métaux que Brillouin s'illustre. En 1930, il résout le problème de la propagation des ondes électroniques au sein d'un réseau cristallin en trois dimensions<sup>352</sup>, en représentant le potentiel introduit par les ions formant

<sup>350</sup> Dans cette dernière, la superposition de deux ondes « électroniques »  $\psi_n$  ou  $\psi_m$  était à l'origine d'un phénomène de battement de fréquence  $\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}$  responsable de l'émission d'ondes électromagnétiques de même fréquence. Voir Jammer (1974), pp. 24-33.

<sup>351</sup> Brillouin (1927), p. 74.

<sup>352</sup> Brillouin (1930).

le réseau comme une perturbation périodique. Il montre ainsi que l'énergie des électrons admet des discontinuités lorsque leur nombre d'onde, représenté par un vecteur dans l'espace réciproque, « traverse » dans ce même espace les bords de zones qu'il définit à l'occasion et qui deviendront célèbres sous le nom de « zones de Brillouin ». La condition dans laquelle l'extrémité du vecteur du nombre d'onde s'appuie sur les bords de ces zones est alors équivalente à la condition de Bragg de diffraction des ondes au sein du réseau.

Brillouin s'intéressera par la suite à la prise en compte des interactions des électrons entre eux au sein du cristal. Les électrons de conduction dans un métal ne subissent effectivement pas uniquement le potentiel dû aux ions de la matrice cristalline, mais interagissent également entre eux. Ce problème à  $N$  corps semble à première vue inextricable puisque la fonction d'onde des électrons dépend des interactions entre les différents électrons qui dépendent elles-mêmes de la fonction d'onde. Hartree (en 1927) et Fock (en 1930) ont cependant forgé une méthode itérative, dite « des champs auto-cohérents » (en anglais « self-consistent ») qui consiste à calculer les interactions à partir d'une fonction d'onde d'essai, puis à calculer à partir de cette interaction une nouvelle fonction d'onde, qui servira à son tour à un nouveau calcul de l'interaction, etc., jusqu'à ce que la fonction d'onde obtenue converge avec celle servant à calculer l'interaction. En 1932, Brillouin s'empare de cette méthode et l'améliore en vue de l'appliquer au traitement des électrons dans les métaux<sup>353</sup>.

Les objectifs de ce programme de recherche, qui suit un séjour effectué par Brillouin à Copenhague,<sup>354</sup> paraissent clairs : mobiliser les outils théoriques les plus adéquats possibles (par exemple, la méthode des champs auto-cohérents) afin de calculer aussi précisément que possible les valeurs des grandeurs telles que les niveaux d'énergies des électrons dans les métaux, et rendre compte des propriétés magnétiques de ces derniers. La méthodologie employée est celle qui consiste à partir des modélisations les plus simples et les plus grossières (par exemple, les électrons dans les métaux sont libres), et de s'approcher du cas « réel » en incorporant progressivement une plus fine description des métaux. Dans cette perspective, les problèmes de fondement théorique propres à la mécanique quantique ne se posent plus. Ce qui est discuté est d'une part l'efficacité de la méthode d'approximation envisagée (c'est-à-dire le rapport entre la précision du résultat obtenu et le coût en temps et en calcul) et d'autre part sa capacité à rendre compte de manière la plus réaliste possible du comportement de l'objet physique modélisé, en justifiant par exemple le fait que tel mécanisme doit être pris en compte (par exemple la possibilité d'échange entre deux électrons placés dans deux états différents) quand d'autres peuvent être négligés. Ainsi, présentant deux méthodes alternatives du champ auto-cohérent – celle due à Hartree et Gaunt et l'autre développée par Fock – Léon Brillouin annonce que, « suivant les problèmes, l'une ou l'autre de ces définitions sera préférable ».

Au total, les contributions de Léon Brillouin à la physique théorique des solides sont de toute première importance. Il est clair que le travail de Léon Brillouin se rapproche de celui du physicien à problème dont l'archétype fut Sommerfeld, ce qui n'est pas totalement un hasard lorsque l'on sait que ce dernier participa à Munich à sa formation. Cependant, Léon Brillouin est loin d'avoir à son actif les mêmes mérites que Sommerfeld en ce qui concerne la formation de théoriciens. Les forces en présence sur lesquelles il pouvait s'appuyer en France n'étaient certes pas les mêmes, mais on peut néanmoins

---

<sup>353</sup> Brillouin (1932-B). L'auteur indique en effet à la fin de cet article : « Les formules établies dans ce travail me serviront de base pour une étude sur les électrons libres dans les métaux, à paraître prochainement ». p. 389.

<sup>354</sup> Les références bibliographiques des travaux pourtant sur la physique du solide sont totalement étrangères, ce qui n'est pas réellement surprenant lorsque l'on sait que Brillouin est le seul physicien français engagé dans ce champ de recherche à cette période.

penser qu'à partir du milieu des années 1930, elles étaient suffisantes pour organiser autour de lui une petite équipe travaillant sur la théorie quantique des métaux. Or, une telle dynamique ne s'est jamais amorcée.

Du fait de leur nature même, les questions de principe sont largement absentes des travaux de Léon Brillouin, qui ne semble jamais s'occuper de très près des problèmes d'interprétation de la mécanique quantique, même s'il fut par ailleurs assez ouvert aux questions philosophiques soulevées par la science contemporaine (notamment celles liées à la théorie de l'information<sup>355</sup>). En réalité, comme nous le verrons dans la section que nous consacrerons à la réception épistémologique et philosophique de la mécanique quantique, Léon Brillouin défendait une vision des sciences relativement positiviste, qui devait l'immuniser contre des questions d'ordre métaphysique comme le déterminisme ou l'ontologie derrière les théories.

b) Jacques Solomon : le représentant français de « l'école de Copenhague »

Ayant effectué des études de médecine au milieu des années 1920, Jacques Solomon fait la rencontre décisive de Paul Langevin – qui deviendra son beau-père - en 1927, se réoriente vers la physique théorique<sup>356</sup> et devient ami de Léon Rosenfeld, un des plus grands spécialistes de la théorie quantique des champs des années 1930 et un proche collaborateur de Niels Bohr. L'obtention d'une bourse de la Fondation Rockefeller lui permet de faire de nombreux séjours à l'étranger, notamment à Copenhague auprès de Niels Bohr. Cette ouverture sur l'étranger lui permet dès le début de sa carrière de théoricien de s'intégrer dans le grand courant de recherches structurées autour de la théorie quantique des champs, et plus particulièrement de l'électrodynamique quantique, à laquelle il consacre sa thèse<sup>357</sup>. Il collabore avec Léon Rosenfeld en 1931 à la résolution du premier – et sans doute moins grave – problème d'infini de la théorie quantique des champs : la valeur infinie de l'énergie du point zéro<sup>358</sup>.

L'article consiste essentiellement à faire un autre choix de l'Hamiltonien du champ électromagnétique que celui qu'on utilise traditionnellement. Les trois points du cahier des charges pour son expression sont d'éviter l'utilisation des potentiels scalaires et vecteurs (qui mènent à des redondances dans la définition des champs, rendant problématique l'énoncé des lois de non-commutation), de tendre vers l'expression traditionnelle de l'énergie électromagnétique à la limite non-quantique permettant ainsi de retrouver les équations de Maxwell, et enfin de posséder des valeurs propres données par l'expression  $\sum n_i h\nu_i$  plutôt que  $\sum (n_i + \frac{1}{2}) h\nu_i$ . L'article n'aborde cependant pas les problèmes d'interactions entre matière et rayonnement, qui constituent la réelle pierre d'achoppement de la théorie.

Solomon continue la même année, cette fois en solitaire, l'exploration des difficultés que traverse la physique quantique relativiste à cette période<sup>359</sup>. Il aborde enfin, à cette occasion, les problèmes d'interaction du champ électromagnétique et de l'électron, mais également ceux liés aux niveaux d'énergie négative dans la théorie de l'électron de Dirac. Plus précisément, Solomon tente de délimiter les problèmes que pose l'actuelle électrodynamique quantique en essayant de dégager ce qui pose de réelles difficultés et ce qui peut être surmonté sans grandes modifications de la théorie. Après

---

<sup>355</sup> Voir Brillouin (1959).

<sup>356</sup> Voir Bustamente (1997).

<sup>357</sup> Solomon (1931).

<sup>358</sup> Rosenfeld, Solomon (1931).

<sup>359</sup> Solomon (1932).

avoir affronté le problème de l'énergie infinie de point 0 du champ libre avec Rosenfeld, il aborde ici deux autres types d'infinis.

Le premier correspond à l'énergie électrostatique de l'électron, et relève d'un aspect qui était déjà présent dans l'électrodynamique classique. Il découle du fait que la forme de l'énergie électrostatique d'une charge sphérique est proportionnelle à  $\frac{e^2}{a}$ , où  $a$  est le rayon de la sphère, qui tend vers 0 lorsque la charge est ponctuelle. Les électrodynamiciens classiques pouvaient contourner cet obstacle en supposant que le rayon de l'électron n'était pas nul, mais possédait une valeur  $a_0$ , appelé « rayon classique de l'électron ». Cependant, aucune place dans le formalisme de la mécanique quantique non-relativiste, ni dans celui de la théorie quantique des champs, ne semble exister pour la prise en compte d'un tel paramètre. Solomon montre que l'on peut néanmoins éviter cette difficulté de façon invariante sur le plan relativiste. Partant de la remarque que l'énergie électrostatique, qui est à l'origine au moins partiellement de la masse de l'électron, est déjà contenue dans l'Hamiltonien de l'électron, et qu'il ne devrait donc pas contribuer une seconde fois à l'énergie totale du système, Solomon parvient à introduire une modification du Lagrangien du champ électromagnétique qui conserve l'invariance relativiste et les équations de Maxwell, tout en introduisant une soustraction du terme de l'énergie électrostatique de l'électron. La prise en compte de l'énergie électrostatique dans la masse de l'électron mènera par la suite les physiciens à prendre conscience que sa masse réelle n'est pas celle observée, ce qui initiera le programme de la renormalisation de la masse, et validera l'intuition encore imprécise de Solomon.

Le second problème, qui trouvera également sa solution dans la renormalisation de la masse, se révélera par contre bien plus difficile à surmonter. Il dérive de la prise en compte des perturbations du second ordre introduit par l'interaction entre l'électron et le rayonnement électromagnétique (c'est-à-dire les composantes transversales du champ<sup>360</sup>). Physiquement, il correspond au fait que l'Hamiltonien d'interaction entre le rayonnement et l'électron couple les états du vide électromagnétique (0 photon présent) avec une infinité d'états à un photon présent (chaque mode du photon correspondant à un état). Or, la correction du second ordre se révèle être la somme (ou plutôt l'intégrale) de termes correspondant à chacune de ces « transitions virtuelles » vers des états à un photon présent, et diverge. Solomon conclut que « la théorie de l'interaction entre ondes matérielles et ondes électromagnétiques est inexacte<sup>361</sup> ».

Une conclusion tout aussi pessimiste se dégage de l'étude des difficultés liées à l'existence d'énergies négatives dans la théorie de Dirac. Solomon démontre les impasses dans lesquelles mène l'hypothèse de Dirac qui consiste à considérer les protons comme des trous dans la mer des états d'énergie négative. Nous sommes au début de l'année 1931, soit encore avant que Dirac identifie ces trous non plus au proton, mais à une nouvelle particule, le positron, qui sera découvert l'année suivante. Si donc le proton est un tel trou, Solomon démontre qu'un électron au sein d'un atome devrait inévitablement y tomber. La conclusion apportée par Solomon est que la théorie de Dirac cesse d'être valable lorsque l'électron se rapproche d'une « zone dangereuse » correspondant à une distance de  $\frac{h}{4\pi m_0 c}$ , distance qui marque ainsi les limites de validité des actuelles tentatives de combiner la théorie de la relativité et la mécanique quantique. Solomon tente enfin de relier ces difficultés à

<sup>360</sup> Le champ électromagnétique peut se décomposer en termes transversaux (correspondant aux ondes électromagnétiques) et en un terme longitudinal, qui correspond au champ électrostatique. C'est ce dernier terme qui est responsable de l'énergie électrostatique infinie de l'électron, et ce sont ces premiers termes qui sont responsables de l'énergie infinie qui apparaît dans les corrections perturbatrices du second ordre.

<sup>361</sup> *Ibid.* p. 335.

d'autres qui concernent la physique nucléaire (spin du noyau — nous sommes alors un an avant la découverte du neutron, le noyau est censé être composé d'électrons et de protons —, non-conservation apparente de l'énergie dans la désintégration  $\beta$  — l'hypothèse du neutrino n'a pas encore été émise).

La conclusion d'ensemble de Solomon est donc plutôt pessimiste en ce qui concerne la validité complète des théories quantiques actuelles :

« Il semble donc qu'une réforme profonde de nos théories soit nécessaire : il sera nécessaire d'obtenir un système d'équations non relatives à l'espace et au temps et qui, lorsqu'on pourra conserver des intervalles de temps et d'espace suffisamment grands, se réduiront à l'équation de Dirac. Peut-être pour la recherche de ces équations, la théorie de quantification des champs se montrera-t-elle un instrument commode<sup>362</sup> ».

Solomon participe d'un pessimisme qui est relativement courant à cette période en ce qui concerne la possibilité de rendre compatible les idées quantiques et relativistes dans leur état actuel. Il est d'ailleurs remarquable de constater qu'il partage les mêmes centres d'intérêt que les *leaders* de la physique quantique de l'époque, notamment Pauli, Heisenberg ou encore Dirac, dont les activités de recherche étaient largement concentrées sur les problèmes des infinis en théorie quantique des champs et sur ceux suscités par l'équation de Dirac<sup>363</sup>, et dont les craintes concernant la validité de la mécanique quantique dans le domaine des très hautes énergies et des très petites distances étaient les mêmes. Certes, tous les résultats obtenus dans cet article ne sont pas nouveaux. Sans doute le plus important d'entre eux, le calcul de perturbation au second ordre due à l'interaction entre un électron de Dirac et le rayonnement, avait par exemple été effectué par Oppenheimer dès 1929 et publié en 1930 dans *Physical Review*<sup>364</sup>, alors que Solomon présente ce résultat comme une nouveauté<sup>365</sup>. Cependant, la bibliographie de l'article est remarquablement récente comparée à ce que l'on peut habituellement trouver dans les articles du *Journal de Physique* (elle comporte 8 articles publiés en 1931, soit l'année de la rédaction du texte, 8 publiés en 1930, 4 en 1929, 3 en 1928 et 1 en 1927), et d'ailleurs exclusivement étrangère (la quasi-totalité provenant de journaux allemands.) Par ailleurs, le fait qu'il soit l'un des rares Français à publier dans la *Zeitschrift für Physik* montre sa bonne immersion dans ce courant de recherche qui était alors à la pointe des applications de la théorie quantique pour les problèmes des interactions fondamentales et des constituants élémentaires de la matière. Sa collaboration avec Wolfgang Pauli pour un article portant sur l'incorporation de l'équation de Dirac au sein de la relativité générale confirme ce constat.

Toujours en lien avec la volonté d'appliquer la mécanique quantique dans des domaines où sa validité reste questionnée, avec en arrière plan l'ambition d'en préciser les limites, Solomon va également s'intéresser à un autre problème urgent de la physique de son époque : les interactions nucléaires. Il publie en 1933 un article portant sur l'interaction entre le proton et le tout nouveau neutron. Se dégage ici une démarche modélisatrice relativement phénoménologique, explorant et

---

<sup>362</sup> *Ibid.* p. 340

<sup>363</sup> Voir Schweber (1994) ou Pais (1986).

<sup>364</sup> Oppenheimer (1930).

<sup>365</sup> Comme le laisse sous-entendre cette phrase : « Nous aboutissons donc au résultat suivant, dont on permettra de signaler l'importance : la théorie de la quantification des champs ne conduit pas seulement à une énergie électrostatique propre infinie pour les électrons, mais également à une énergie d'interaction infinie entre le rayonnement et l'électron. ». Tout juste reconnaît-il que « Ce fait a été aperçu par I. Waller dans un travail trop peu connu », mais dans le cas d'un électron non-relativiste, et par Léon Rosenfeld, pour un oscillateur harmonique. p 335. Pourtant, l'article d'Oppenheimer en question est cité par Solomon, mais à propos non pas du résultat mentionné, mais d'une technique de calcul réutilisée par Solomon.

comparant différentes fonctions d'interactions entre ces deux particules, poussant les calculs jusqu'à leur terme, comparant les résultats quantiques de sections efficaces avec les résultats classiques, et rentrant en discussion avec l'état actuel des recherches expérimentales, faisant de ces dernières une composante essentielle des avancées théoriques dans ce domaine :

« Il faut ainsi espérer que les progrès expérimentaux prochains permettront une étude plus détaillée de la question sur la base que nous venons de développer en nous fournissant des renseignements plus complets sur la variation du rayon d'action du neutron en fonction de la vitesse des protons incidents<sup>366</sup>. »

Cette même démarche se retrouve dans ses travaux de la seconde moitié des années 1930 portant sur les interactions des rayons cosmiques avec la matière. À titre d'illustration de cette démarche, nous décrivons un peu plus précisément le contenu d'un article publié en 1936 et portant sur les désintégrations nucléaires provoquées par les rayons cosmiques<sup>367</sup>.

L'objet de cet article est de calculer la probabilité de désintégration d'un noyau nucléaire provoquée par le passage d'un électron de très grande énergie, et d'en tirer des conséquences sur l'interprétation d'un certain nombre d'observations expérimentales (notamment la question de savoir si la présence de protons au niveau du sol est due à des éjections de ces particules par des noyaux provoquées par le passage de rayons cosmiques). Pour ce faire, Solomon présente deux approches essentiellement différentes du problème, mais qui aboutissent au même résultat.

La première approche est basée sur un traitement dérivé d'un modèle intégralement quantique et relativiste de l'interaction entre un électron et un noyau. L'électron est modélisé par un spineur de Dirac et le noyau est modélisé par des nucléons qui possèdent un spectre discret d'états liés et un spectre continu d'états libres. Le calcul consiste alors à obtenir la probabilité de transition entre l'état fondamental d'un des nucléons et un des états libres du spectre continu, cette probabilité étant ensuite intégrée sur le spectre des états libres pour obtenir la section efficace d'un tel processus. L'Hamiltonien d'interaction est choisi de façon à coupler directement l'électron incident et le nucléon du noyau ou, pour employer un autre langage, la transition étudiée correspond à un élément de matrice qui couple l'état « électron incident à l'état initial, nucléon au niveau fondamental » et l'état « électron incident à l'état final, nucléon dans un des états libres », l'opérateur de couplage étant choisi de manière à ce que le modèle soit relativiste. Prenant en compte le fait qu'il existe de nombreux nucléons au sein du noyau, et faisant toutes les approximations que le modèle semble justifier, Solomon obtient alors une estimation approximative de la section efficace en fonction des paramètres du problème.

Solomon s'attache alors à montrer qu'une autre façon d'aborder le problème conduit au même résultat. Cette fois-ci, l'électron incident est décrit classiquement<sup>368</sup>, et c'est son champ électromagnétique, décomposé en composantes de Fourier, et non plus lui directement, qui cause l'éjection du nucléon, c'est-à-dire la transition entre l'état lié fondamental et un état libre. Le problème revient donc à estimer la probabilité de transition d'un nucléon dans un champ électromagnétique donné.

---

<sup>366</sup> Solomon (1933), p. 219.

<sup>367</sup> Solomon (1936).

<sup>368</sup> C'est-à-dire : on ne le décrit pas par une fonction d'onde mais par la donnée d'une position et d'un moment à chaque instant.



Cependant, afin de calculer l'élément de matrice en question (qui est le même dans l'une ou l'autre des méthodes), il faut connaître la fonction d'onde initiale et la fonction d'onde finale du nucléon, ce qui ne pose aucun problème pour la première (il s'agit simplement d'une particule libre), mais pose la question de la structure du noyau dans la seconde (quel est le potentiel d'interaction nucléaire qui détermine la fonction d'onde d'un nucléon au sein du noyau ?). Solomon se contente d'un modèle grossier proposé par Bethe et Peierls pour le noyau du deuteron<sup>369</sup>, en l'adaptant à d'autres noyaux. Il tire ainsi les estimations suivantes :

« Par exemple, dans le cas du xénon gazeux, dans les conditions normales de température et de pression, on devra observer l'éjection d'une particule lourde sur  $10^6$  cm de parcours [de l'électron incident]. Pour le cas du diplogène liquide, on l'observerait une fois sur 400 mètres de parcours<sup>370</sup> », etc...

Et de conclure :

« Toutes ces considérations nous expliquent la rareté relative des désintégrations observées lors de l'étude des rayons cosmiques par la méthode de la chambre de Wilson. Notons que si l'on arrive à mettre hors de doute l'existence dans ce rayonnement cosmique au niveau du sol et plus bas de protons de très grande énergie, les calculs précédents plaident plutôt en faveur d'une origine primaire de ces particules<sup>371</sup>. »

En résumé, Solomon participe d'une démarche résolument pragmatique d'utilisation de la mécanique quantique dans des domaines variés dans lesquels sa validité pose encore question (principalement en électrodynamique quantique, et en physique nucléaire et des rayons cosmiques) mais pour lesquels une confrontation expérimentale est souvent possible<sup>372</sup>. Il suit en cela, comme l'atteste la richesse de sa bibliographie, les courants de recherche principaux de la physique théorique internationale de son temps, fédérés notamment autour des figures emblématiques que sont Niels Bohr, Werner Heisenberg et Wolfgang Pauli.

Solomon ne participe pas seulement à ces grands courants de pensée que l'on a pu amalgamer, peut-être abusivement, par l'expression « École de Copenhague », par sa contribution à la théorie quantique des champs et à la physique nucléaire. Il partage également avec ces physiciens d'Europe centrale la conviction que, si la mécanique quantique n'est pas la théorie ultime du monde (on vient de le voir par rapport à ces problèmes dans le domaine relativiste), un retour aux anciennes conceptions déterministes ne saurait être envisagé. Il proposa ainsi en 1932 une démonstration de l'impossibilité d'une théorie à variable cachée qui viendrait rendre compte des prédictions – déjà maintes fois confirmées – de la mécanique quantique non-relativiste. Cette démonstration, qui apparaît peu de

---

<sup>369</sup> Noyau composé d'un proton et d'un neutron. Aussi appelé deuteron.

<sup>370</sup> *Ibid.*, p. 75.

<sup>371</sup> *Ibid.*

<sup>372</sup> Même si les uniques résultats expérimentaux importants dans le domaine de l'électrodynamique seront pendant les années 1930 la découverte du positron et celle de son annihilation avec l'électron, ce domaine constituera une pierre de touche pour l'applicabilité du formalisme quantique aux champs, en ce qu'il permet la confrontation entre un calcul directement tiré de l'électrodynamique et des formules empiriques depuis longtemps connues (largeur des raies spectrales, diffusion de la lumière par les atomes). La physique nucléaire et celle des rayons cosmiques (d'ailleurs souvent entrelacées) seront en revanche un champ de recherche où les avancées théoriques et expérimentales iront de concert.

temps après celle proposée par John Von Neumann, est cependant entachée d'une erreur de calcul qui invalide le raisonnement de Solomon<sup>373</sup>.

Solomon participe finalement d'une pratique de la physique théorique qui joue en quelque sorte le rôle d'intermédiaire entre deux conceptions de cette discipline qui vont se succéder, notamment en France, au cours du XX<sup>e</sup> siècle : la physique en tant qu'entreprise qui relève d'une philosophie naturelle — d'où son vif intérêt pour les questions d'implications philosophiques de la mécanique quantique — et la physique en tant que pratique de coordination et d'anticipation des résultats expérimentaux — que l'on peut observer à travers sa pratique de physicien à problèmes. N'eût-ce été d'une part le fait qu'une grande partie de son énergie ait été absorbée par des causes politiques et d'autre part, sa mort précoce<sup>374</sup>, il est très probable que Jacques Solomon serait devenu un acteur majeur de la reconstruction de la physique théorique française après la seconde guerre mondiale et de son ouverture à l'étranger.

c) Alexandre Proca : des tentatives hétérodoxes dans l'approche des phénomènes fondamentaux

Ce rôle de reconstructeur qu'aurait pu accomplir Solomon a été — selon un nombre important de physiciens théoriciens de l'après-guerre — effectué par Alexandre Proca. L'idée selon laquelle Proca incarnerait en France une école théorique plus internationaliste, plus pragmatique et plus en phase avec les préoccupations des physiciens de l'époque, en opposition avec l'école française, dominante au moins jusqu'à la seconde guerre mondiale, et représentée par Louis de Broglie, est extrêmement répandue parmi les physiciens qui ont débuté leur carrière au cours des dix ou vingt premières années d'après-guerre. Nous reviendrons plus tard sur le rôle effectif qu'a joué Alexandre Proca pour fédérer de nombreux jeunes théoriciens français et les maintenir en contact avec la physique internationale dans l'immédiat après-guerre. Mais nous pouvons déjà dire qu'à cet égard, la réputation de Proca est largement justifiée. En revanche, il ne semble pas que sa production scientifique des années 1930 soit particulièrement représentative d'une opposition de style entre une démarche qui serait plus pragmatique pour Proca et plus spéculative pour Louis de Broglie, ni qu'elle soit davantage située dans la droite ligne des travaux qui se font à l'étranger. Comme nous allons le voir, bien que dès cette période Proca soit particulièrement ouvert à ce qui se passe à l'étranger, ses écrits restent, tout au long de la décennie, très généraux et très abstraits, et sa compréhension et son application des théories quantiques ne semblent pas forcément être celles qui prévalent au sein des grands courants de la physique internationale des années 1930<sup>375</sup>.

Proca débute sa carrière de physicien au cœur des années 1920 à l'Institut du Radium sous la supervision de Marie Curie. À partir de 1926-1927, il se réoriente vers la physique théorique et s'intéresse plus particulièrement à la théorie des quanta.

Ses premières contributions sur le sujet se révèlent être, somme toute, assez idiosyncrasiques. Il publie en 1928 une tentative de généralisation des conditions de quantification de Bohr pour tenter de rendre compte de la cohérence de la lumière émise par un atome (c'est-à-dire, *in fine*, rendre compte des phénomènes d'interférence) tout en conservant l'hypothèse des quanta de lumière. L'idée principale consiste à démontrer qu'en plus des conditions de quantification spatiale qui déterminent les niveaux d'énergie de l'électron au sein d'un atome (c'est-à-dire  $\oint \vec{p} \cdot d\vec{r} = n\hbar$ ), il existerait une

---

<sup>373</sup> Voir Colin (2010).

<sup>374</sup> Résistant, Jacques Solomon fut fusillé par les Allemands en 1942.

<sup>375</sup> Pour une biographie de Proca, voir l'introduction de son fils Georges Proca dans Proca (1988).

condition de quantification temporelle (dérivée à partir d'une quantification de la partie temporelle de l'action) qui permettrait de déterminer les périodes possibles qui séparent l'absorption et l'émission d'un quantum de lumière, ou bien deux émissions successives. Or ce serait selon Proca le fait que ces périodes soient bien déterminées qui expliquerait la cohérence de la lumière. Le cadre conceptuel mobilisé est celui de l'ancienne théorie des quanta, et Proca ne fait référence à l'équation de Schrödinger que dans la mesure où cette dernière permet de définir la fonction d'action (qui correspond à la phase de l'onde) à quantifier. Il indique d'ailleurs :

« On peut donc dire que l'explication de la cohérence était déjà contenue dans les postulats de Bohr<sup>376</sup> et dans l'équation de Schrödinger. Mais ce n'est que pour avoir une plus grande généralité que nous avons utilisé dans ce qui précède l'équation de Schrödinger ; le résultat obtenu est complètement indépendant de toute considération de mécanique ondulatoire ».

Et plus loin :

« Tous les résultats de la théorie des quanta et, en plus, la cohérence, sont donc qualitativement compris dans les deux postulats de Bohr. On ne peut s'empêcher d'admirer l'intuition vraiment géniale qui a réussi à condenser en ces deux énoncés simples, les principes qui régissent un nombre immense, probablement la totalité, des phénomènes naturels<sup>377</sup> ».

Cet article tend à montrer que Proca n'avait pas encore digéré l'avancée – il est vrai encore toute récente – que constituait la mécanique ondulatoire (et plus généralement la mécanique quantique) dans l'interprétation des phénomènes atomiques. Il ne semble en particulier pas admettre à ce moment que la mécanique ondulatoire a relégué les conditions de Bohr au rang de simples conséquences des conditions aux limites de l'équation de Schrödinger et qu'aucune de ces conditions aux limites ne pourrait rendre compte de la quantification temporelle qu'il propose<sup>378</sup>.

Un autre article, écrit en 1929, est caractérisé par l'extrême originalité de son approche des problèmes quantiques<sup>379</sup>. Ce travail, qui met une nouvelle fois en lumière la priorité qu'il accorde au concept de quantification de l'action (par rapport aux développements quantiques à partir desquels cette quantification est censée seulement découlée), a pour origine une étude des analogies formelles entre la thermodynamique classique (macroscopique) et la mécanique analytique d'Hamilton. Rapprochant la formulation du principe de Carnot et du principe d'Hamilton de moindre action, Proca remarque notamment que l'action Hamiltonienne  $S$  joue dans ce dernier principe un rôle formel analogue celui que joue l'entropie dans le principe de Carnot, et propose ainsi d'appeler l'action

---

<sup>376</sup> Le postulat en question est la condition de quantification de l'action.

<sup>377</sup> Proca (1928).

<sup>378</sup> De fait, l'équation de Schrödinger d'un électron au sein d'un atome en l'absence de champ électromagnétique extérieur n'a absolument rien à dire sur la durée de vie de l'excitation de cet électron. Le temps moyen au bout duquel le photon est émis (le moment de l'émission n'étant d'ailleurs jamais rigoureusement déterminé) ne peut être calculé qu'en introduisant un terme de couplage entre l'électron et le champ électromagnétique. Outre le phénomène d'émission spontanée qui se passe même en l'absence de champ extérieur, et qui est lié au fait que l'état du vide électromagnétique n'est pas un état propre de l'Hamiltonien d'interaction entre l'électron et le champ, ce temps dépendra également de l'état du champ électromagnétique extérieur, et notamment du nombre de photons présents (émission stimulée). À l'époque de cette publication, Dirac avait déjà, certes depuis peu, posé les fondements théoriques nécessaires à la compréhension de ces phénomènes dans un cadre exclusivement quantique (c'est-à-dire en se passant du principe de correspondance).

<sup>379</sup> Proca (1929).

« entropie mécanique ». Or, ces « entropies » jouent un rôle de « facteur de capacité » pour les formes d'énergie auxquelles elles correspondent, c'est-à-dire que multipliées par un terme caractéristique d'une forme d'énergie — la température pour la chaleur, l'inverse d'un temps pour « le potentiel cinétique » (le Lagrangien) —, elles permettent de calculer l'énergie en question. Proca indique alors :

« Or, l'observation nous montre que chaque fois qu'un élément physique a une structure discontinue, il est, énergétiquement un facteur de capacité d'une certaine forme d'énergie ».

Proca donne l'exemple de l'électricité, facteur de capacité de l'énergie électrique, ou encore de la quantité de matière, facteur de capacité de « l'énergie de niveau ». Le fait que l'action soit discontinue devient ainsi pour Proca aussi peu problématique, aussi compréhensible que le fait que l'électricité le soit. Et de conclure :

« Par conséquent, on est fondé de penser que toutes ces constatations sont des aspects d'une loi générale, d'un principe de l'atomicité des entropies : le facteur de capacité de toute forme d'énergie ne peut varier que d'une façon discontinue »<sup>380</sup>.

Proca tente alors de fonder sur ce principe une façon très originale de revisiter la mécanique ondulatoire. Par analogie avec l'interprétation statistique de l'entropie thermodynamique ( $S = -k \log P$ , où  $P$  est la probabilité de trouver un état macroscopique particulier), Proca pose que l'action Hamiltonienne  $S$  doit être proportionnelle au logarithme de la probabilité de trouver un système mécanique à un point particulier de l'espace (représentée par  $\psi$ ). En choisissant comme facteur de proportionnalité  $-\frac{\hbar}{i}$ , il obtient la relation  $\psi = e^{\frac{i}{\hbar}S} (*)$  qui n'est bien sûr pas sans rappeler la relation entre la fonction d'onde de la mécanique ondulatoire et sa phase. Bien entendu, Proca a conscience que ce terme est imaginaire, et introduit à cette occasion une digression sur la possibilité de généraliser la notion de probabilité<sup>381</sup>.

En écrivant ensuite l'équation classique d'Hamilton-Jacobi, et en exprimant  $S$  en fonction de  $\psi$ , il retombe sur une équation qui ressemble, mais qui n'est pas identique à l'équation de Schrödinger, excepté le cas où on impose une condition supplémentaire. Proca reconnaît que sa démarche (partir de l'équation d'Hamilton-Jacobi en y introduisant la relation  $(*)$  et en ajoutant une condition pour retrouver l'équation de Schrödinger) est exactement l'inverse de ce qui se fait habituellement, et qui consiste à démontrer comment l'équation d'Hamilton-Jacobi dérive de l'approximation de l'optique géométrique de l'équation de Schrödinger. Son approche ne consiste en rien de moins que de renverser ce qui relève des premiers principes et ce qui relève de leurs conséquences :

« L'équation de Schrödinger ne résulte des équations générales du mouvement que si l'on impose une condition supplémentaire. Cette équation ne régit pas tous les mouvements imaginables. On est tenté de penser [...], qu'un mouvement quelconque ne se fait pas nécessairement par ondes de phase, au sens de Broglie-Schrödinger.

Cela n'est vrai que pour des cas particuliers, très fréquents cependant, et notamment pour les mouvements intra-atomiques. Le mouvement par ondes n'est donc pas nécessaire, comme le suppose la mécanique ondulatoire. Les hypothèses de celle-ci sont trop restrictives. »

---

<sup>380</sup> Proca (1929).

<sup>381</sup> Nous reviendrons sur ce point ultérieurement.

Quelques remarques peuvent être faites sur ces deux premiers travaux que nous avons étudiés. Premièrement, Proca se révèle très ambitieux, puisque l'objet de ces deux études, si les résultats de celles-ci se révélaient être confirmés, aurait des conséquences extrêmement importantes en microphysique. D'autre part, ces travaux possèdent un caractère extrêmement spéculatif et audacieux. Les bases physiques sur lesquelles reposent les propositions de Proca restent assez fragiles et les arguments qu'il mobilise relèvent de séduisantes – mais pas entièrement convaincantes – analogies formelles : analogie formelle entre la quantification de la partie spatiale de l'action et celle de sa partie temporelle dans le premier cas, et analogie formelle entre la place réservée à l'entropie dans le formalisme de la mécanique analytique et celle réservée à l'action dans le formalisme de la même mécanique analytique. En reprenant notre classification des théoriciens, Proca correspondrait très bien au profil d'un formaliste. Ensuite, Proca ne semble pas décider, au cours de ces années, à considérer la nouvelle mécanique quantique comme le fondement de toute démarche rigoureuse dans les problèmes de microphysique. Plus encore, le concept de quantification de l'action semble avoir pour lui la préséance sur les autres concepts introduits par la mécanique quantique ou la mécanique ondulatoire<sup>382</sup>, alors que ce concept perd une bonne partie de sa signification dans ce formalisme<sup>383</sup>. La principale conséquence de ce fait est qu'il ne peut alors pas s'inscrire dans une démarche pragmatique d'application des nouvelles théories quantiques à des problèmes physiques concrets, et qu'il reste donc à un niveau de discussion très fondamental.

Proca réoriente cependant son attention, suivant, semble-t-il, les recommandations de Louis de Broglie<sup>384</sup>, vers l'étude de la théorie de l'électron de Dirac, un sujet un peu plus courant dans la physique théorique de cette période, sujet auquel il consacre sa thèse de Doctorat soutenu en 1933 devant un jury composé de Jean Perrin, Louis de Broglie et Léon Brillouin. Ici encore, son approche reste formelle. Il montre en 1930 une façon de rendre plus symétrique l'équation de Dirac en supposant que la fonction d'onde n'a plus 4 mais 16 éléments, éléments qu'il rattache aux différents degrés de liberté de l'électron. Chacun de ces éléments, correspondant donc à une grandeur de l'électron (par exemple ses coordonnées, ses moments, ses moments électriques et magnétiques, et même sa masse et sa « grandeur conjuguée », la « longueur d'onde de Louis de Broglie<sup>385</sup> »), est

---

<sup>382</sup> George Proca, le fils d'Alexandre, a laissé sous-entendre que cet article aurait pu être considéré comme un crime de lèse majesté vis-à-vis de l'orthodoxie ondulatoire de Broglie qui dominait à l'époque en France : « C'est la première fois que mon Père publie un article où il se démarque des conceptions ondulatoires. Dans une situation institutionnelle telle que celle régnant en France et où l'émiettement de la recherche est extrême, tout « chef de file » est porté à devenir sourcilieux envers quiconque ne partage pas ses vues. C'est dire que publier un article où l'on ose seulement montrer que les théories ondulatoires ne sont pas nécessairement tout, équivaut à faire preuve d'anticonformisme vis-à-vis des thèses professées par L. de Broglie » (dans Proca (1988), introduction). Le texte de George Proca est cependant à caractère polémique vis-à-vis de Louis de Broglie et rien ne permet de confirmer que le texte de son père a réellement suscité chez Louis de Broglie une telle réaction, surtout à une époque marquée par une grande incertitude chez ce dernier quant à la signification réelle des théories quantiques.

<sup>383</sup> La mécanique quantique n'implique nullement que l'action de tout processus naturel doit être un multiple de la constante de Planck. Par exemple, dans le cas d'une particule dans un champ de force, l'action correspond à la phase de l'onde divisée par la constante de Planck. Or, d'après l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde, la particule possède lors d'une mesure une chance non nulle d'être trouvée à n'importe quel point de l'espace au niveau duquel la fonction d'onde n'est pas nulle, point correspondant à n'importe quelle valeur de la phase. En réalité, parler même de la valeur de l'action pour une particule quantique ne fait pas grand sens puisque ce concept suppose la notion de trajectoire qui n'a plus sa place dans ce formalisme.

<sup>384</sup> Proca (1988), introduction.

<sup>385</sup> Ainsi que l'appelle Proca. Il s'agit en fait de ce que l'on appelle la longueur d'onde de Compton. Proca utilise ici le formalisme d'un espace à 5 dimensions (5 comme le nombre de termes qui apparaît dans l'équation

susceptible de recevoir une interprétation probabiliste si on le développe en série de fonctions dont chacune représente la probabilité de trouver l'électron avec la valeur de la grandeur correspondante. Cette tentative de reformuler et de réinterpréter la théorie de Dirac, une nouvelle fois très spéculative, se situe dans le courant d'un ensemble de travaux d'exploration formelle sur l'équation de Dirac, poursuivis également ailleurs par des physiciens comme Eddington, Darwin ou Lanczos, et qui ont pour principal objectif d'essayer de circonscrire les difficultés auxquelles elle fait face. Cet article de Proca ne débouchera pas toutefois sur des résultats très probants, tout comme sa tentative, effectuée en 1932, de rendre compte de la différence de masse de l'électron et du proton<sup>386</sup> à partir d'une reformulation des équations de l'électrodynamique classique, qui sera très sévèrement critiquée par Jacques Solomon dans une lettre envoyée à l'auteur<sup>387</sup>. Nous le voyons, une grande disparité d'objets et de thèmes d'étude, mais une approche formelle constante, caractérisent les travaux de Proca au début de sa carrière.

Cependant, la suite fait apparaître un fil conducteur dans ses recherches : ses tentatives d'établir de nouvelles équations d'onde pour les particules élémentaires. Elles se situent dans une période de confusion pendant laquelle toutes les équations d'onde relativistes connues posent de graves problèmes à l'intérieur du cadre conceptuel de la mécanique ondulatoire<sup>388</sup>. Proca tente ainsi, dans une série d'articles écrits entre 1933 et 1934, de fournir au photon une fonction d'onde  $\psi$  à partir de laquelle les champs électromagnétiques pourraient être dérivés (de manière un peu analogue à la façon dont les champs électromagnétiques dérivent des potentiels vecteurs). Cette fonction d'onde obéit, selon l'approximation choisie, à l'équation de Klein-Gordon<sup>389</sup>, de Pauli<sup>390</sup>, ou de Dirac<sup>391</sup>. Proca tente pour chacun des cas de trouver les relations entre la fonction d'onde (ou ses composantes pour les deux derniers cas) et les champs électromagnétiques obéissant aux équations de Maxwell. Une difficulté liée au fait que la fonction d'onde ainsi choisie ne correspond pas aux propriétés du photon (notamment son spin) persiste cependant et il est tout à fait intéressant de constater que Proca se sort de cette impasse en mobilisant l'hypothèse de Louis de Broglie d'une constitution neutrinienne de la lumière. Proca reviendra en 1936 sur de nouvelles tentatives d'établir une mécanique ondulatoire de la lumière, en utilisant une nouvelle fois, tout en l'adaptant, l'hypothèse d'une structure composée du photon. Mais il s'agira alors d'une infructueuse première tentative d'appliquer l'équation à laquelle il a prêté son nom.

Car c'est surtout pour avoir écrit les équations dites de Proca sous une forme Lagrangienne, et ensuite les avoir appliquées à une théorie du méson, qu'Alexandre Proca est resté célèbre. Sa découverte reste dans la droite ligne du style de recherche que nous avons dégagé : une analyse poussée de l'aspect formel des équations liée cependant à une traduction sémantique (en termes physiques) de celles-ci qui reste assez obscure.

La découverte de Proca prend sa source dans un travail de 1934 de Pauli-Weisskopf sur la quantification du champ scalaire complexe de Klein-Gordon. Ces deux auteurs remarquent qu'une traduction appropriée de ce champ en termes d'opérateurs de création et d'annihilation des particules

---

relativiste  $mc^2 = \sum p^\mu x_\mu$  de même que dans l'équation d'onde de Dirac) dans laquelle cette longueur d'onde joue le rôle d'une 5<sup>e</sup> coordonnée.

<sup>386</sup> Proca (1932).

<sup>387</sup> Archives de l'Académie des sciences (Fonds Proca / Correspondance), Solomon (1931).

<sup>388</sup> Voir annexe.

<sup>389</sup> Proca (1934-A).

<sup>390</sup> Proca (1934-B).

<sup>391</sup> Proca (1934-C).



permet de trouver un mécanisme qui rend compte de l'existence de l'antimatière, tout en évitant d'évoquer l'existence d'une mer de Dirac des énergies négatives. Cependant, Pauli est tout à fait conscient que ce champ scalaire ne convient pas à la description du positron et de l'électron<sup>392</sup>, notamment en ce qui concerne le spin des particules et la statistique.

L'article de 1936 de Proca<sup>393</sup> est une tentative de se réapproprier la démarche de Pauli et Weisskopf en envisageant cette fois un champ d'ondes qui serait compatible avec l'existence du spin de l'électron. Pour obtenir l'équation d'onde d'un tel champ, Proca pose un ensemble de conditions :

«

1. [L'équation d'onde] doit présenter l'invariance relativiste et électromagnétique (invariance de jauge)<sup>394</sup>.
2. La fonction d'onde ne doit avoir que quatre composantes [...] <sup>395</sup>.
3. Le passage au cas de l'existence d'un champ extérieur doit se faire comme toujours en ajoutant aux opérateurs  $\frac{h}{i} \frac{\partial}{\partial x_r}$  les opérateurs  $\phi_r$  du potentiel de ce champ [...].
4. On doit pouvoir former un vecteur d'univers<sup>396</sup> représentant la densité de courant et de charge.
5. En vertu de l'équation fondamentale, ce courant doit satisfaire à une loi de conservation [...].
6. La composante de temps de ce vecteur – la densité de charge – doit pouvoir être positive ou négative [...].
7. On doit pouvoir former un tenseur symétrique de second rang représentant le tenseur d'énergie-quantité de mouvement.
8. En vertu de l'équation fondamentale ce tenseur doit satisfaire à une loi de conservation de la forme  $\partial_r T_{rk} = 0$  ou  $\partial_r T_{rk} = -j_r F_{rk}$  où  $j_r$  est le courant et  $F_{rk}$  le champ extérieur<sup>397</sup>.
9. La densité d'énergie doit pouvoir être positive ou nulle, son expression devra donc être une forme définie positive [...].
10. On doit pouvoir mettre en évidence l'existence d'un spin ou d'un moment magnétique. »

Proca remarque que les deux façons les plus simples d'obtenir une fonction d'onde à quatre composantes sont de choisir un bi-spineur - mais on retombe alors sur la théorie de Dirac à laquelle on cherche justement une alternative - ou de choisir un quadrivecteur. C'est cette dernière solution qui est adoptée. Se placer dans le formalisme lagrangien permet de restreindre considérablement le choix des équations possibles. Il suffit en effet pour respecter l'invariance relativiste de constituer le Lagrangien à l'aide des scalaires de Lorentz dont les plus simples, construits à partir des quadrivecteurs sont :

<sup>392</sup> La méthode qui permet de rendre compte de l'existence du positron tout en évitant l'hypothèse des trous, et qui consiste en une quantification adaptée de l'équation de Dirac, se met au même moment doucement en place et sera utilisée seulement à partir de la seconde moitié des années 1930, pour la première fois par Heisenberg selon Pais (1986).

<sup>393</sup> Proca (1936).

<sup>394</sup> Par invariance de Jauge, Proca fait référence au champ électromagnétique extérieur. Une transformation de jauge appliquée aux champs de Proca ne laisse pas les équations invariantes à cause du terme de masse.

<sup>395</sup> Parce qu'il est inutile d'en avoir plus.

<sup>396</sup> C'est-à-dire un quadrivecteur.

<sup>397</sup> Cette condition est posée en analogie avec l'électrodynamique classique où  $j_r F_{rk}$  est l'expression covariante de la densité de force de Lorentz.

$\psi_r^* \psi_r, \frac{\partial \psi_r}{\partial x_r} \frac{\partial \psi_r^*}{\partial x_r}, (\frac{\partial \psi_s^*}{\partial x_r} - \frac{\partial \psi_r^*}{\partial x_s})(\frac{\partial \psi_s}{\partial x_r} - \frac{\partial \psi_r}{\partial x_s})$ . Écartant le second type de termes<sup>398</sup>, Proca constate que le plus simple lagrangien d'un champ vectoriel satisfaisant aux conditions mentionnées est :

$$L = \frac{\hbar^2 c^2}{2} \sum_{r,s} A_{rs}^* A_{rs} + m^2 c^4 \sum_r \psi_r^* \psi_r$$

$$\text{avec } A_{rs} = \frac{\partial \psi_s}{\partial x_r} - \frac{\partial \psi_r}{\partial x_s}.$$

ou, lorsqu'il existe un champ électromagnétique extérieur, conformément à la condition 3 :

$$L = \frac{\hbar^2 c^2}{2} \sum_{r,s} F_{rs} G_{rs} + m^2 c^4 \sum_r \psi_r^* \psi_r$$

$$\text{avec } F_{rs} = \left( \frac{\partial}{\partial x_r} + iA_r \right) \psi_s^* - \left( \frac{\partial}{\partial x_s} + iA_s \right) \psi_r^* ; G_{rs} = \left( \frac{\partial}{\partial x_r} - iA_r \right) \psi_s - \left( \frac{\partial}{\partial x_s} - iA_s \right) \psi_r^*$$

et  $A_s = \frac{e}{\hbar c} \phi_s$ ,  $\phi_s$  étant les composantes du quadrivecteur potentiel électromagnétique.

Ce Lagrangien mène aux équations dites de Proca.

Il est étonnant, à ce stade, qu'alors même que la démarche de Proca s'inscrit dans celle de Pauli-Weisskopf, qui aboutit naturellement à la quantification du champ, il ne tente pas de quantifier son propre champ, laissant ainsi flotter une ambiguïté profonde quant à sa signification. Il définit pourtant les grandeurs habituelles du champ (tenseur énergie-impulsion, moment cinétique, densité de charge et de courant...) mais continue à les considérer comme des c-nombres. Une telle quantification, qui est certes plus complexe que celle du champ scalaire, aurait permis à Proca de comprendre très vite que son champ ne s'applique pas à l'électron et au positron, mais à une particule de spin 1, comme d'ailleurs le lui signale Rosenfeld dans une lettre :

« Tout d'abord, il me semble que la quantification de votre vecteur complexe va entraîner, au point de vue du principe d'exclusion, les mêmes difficultés que le scalaire de Pauli-Weisskopf ; la statistique de Fermi ne pourra être réalisée pour les mêmes raisons que celles qui sont indiquées dans le mémoire de ces auteurs. D'autre part, je ne suis pas sûr du tout que le spin défini dans votre seconde note (et dont la définition, comme vous le remarquez vous-même, n'est pas équivoque) a les valeurs propres et les autres propriétés requises pour qu'il puisse se substituer au spin de Dirac »<sup>399</sup>.

C'est à la fin de l'année 1937 que Proca donne une signification plus correcte à sa théorie, mais en évitant toujours de la quantifier. Il écrit un article qui développe une limite non-relativiste de sa théorie qui peut grossièrement se résumer ainsi : de la même manière que l'équation de Klein-Gordon se ramène, à la limite non-relativiste, à l'équation de Schrödinger et que celle de Dirac se ramène à l'équation de Pauli, l'équation de Proca, en présence de champs électromagnétiques, se ramène à une équation d'onde à trois composantes qui met en évidence — comme dans la théorie de Pauli — l'existence d'un moment magnétique intrinsèque dont la valeur est égale à celui de l'électron. Par ailleurs, toujours en prenant la limite non-relativiste, il montre que le rapport moment

<sup>398</sup> Dans un article paru en avril de la même année aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, Proca avait également proposé le Lagrangien a priori plus simple de type :  $L = \sum_r \frac{\partial \psi_r}{\partial x_r} \frac{\partial \psi_r^*}{\partial x_r} + k \sum_r \psi_r^* \psi_r$ . Mais ce Lagrangien est défaillant (par exemple, les équations d'ondes qui en découlent ne permettent pas de retrouver les relations de types :  $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ ).

<sup>399</sup> Archives de l'Académie des sciences (Fonds Proca / Correspondance scientifique) Rosenfeld (1936).

magnétique/spin est deux fois plus petit que dans le cas de l'électron, ce qui signifie donc que la particule en question possède un spin deux fois plus grand (i.e. un spin 1). Proca conclut :

« La théorie ne s'applique donc pas aux électrons ordinaires : on peut espérer qu'elle est applicable aux particules du type de l'électron lourd<sup>400</sup> ».

Le chemin qui mène Proca de la découverte de son équation à la bonne interprétation physique de celle-ci est finalement assez tortueux. De plus, même s'il en suggère l'idée<sup>401</sup> à la fin de son article, il n'est ici toujours pas question d'interpréter les grandeurs définies de champs comme des opérateurs. Un manuscrit datant de 1942 donne peut-être une indication sur la raison pour laquelle Proca n'a pas conçu son équation dans le cadre spécifique de la théorie quantique des champs. Ce manuscrit est la préparation d'une intervention qu'il effectue dans le cadre du séminaire Fréchet, intervention dans laquelle il discute de l'interprétation probabiliste du formalisme quantique et de son maintien dans les théories quantiques relativistes. On constate que Proca ne fait pas mention de l'importance du concept de quantification des champs pour dépasser le paradoxe posé par la normalisation de la fonction d'onde à l'unité et la possibilité de création de paires particule-antiparticule, comme le montre le passage suivant :

« 1° Il n'est plus possible dans ces conditions de considérer le problème du mouvement des électrons comme le problème d'un seul corps. L'équation fondamentale de la mécanique ondulatoire n'est plus l'équation du mouvement d'un seul corps, mais définit un problème de plusieurs corps. En effet, le phénomène de matérialisation ne permet plus d'affirmer que dans un espace si petit fut-il, un électron restera toujours seul.

2° Une autre conséquence est le fait que cela n'a plus aucun sens de parler de nombre de particules dans un volume  $dx.dy.dz$ . (puisque dans ce volume peuvent apparaître et disparaître un nombre indéterminé d'électrons). La notion de densité de nombre de particules n'a plus de sens. L'expression

$$\rho = \psi^* \psi dx. dy. dz$$

Ne peut plus avoir donc la même interprétation physique que jusqu'à présent. Que représente-t-elle dans ce cas ?

On s'en tire de la façon suivante. Dans le cas où l'on interprète  $\rho$  comme un nombre d'électrons, il suffit de le multiplier par la constante  $e$  pour avoir la charge du nuage dans  $dx.dy.dz$ .

$$\int e\psi^* \psi dV = e$$

En vertu des conditions de normalisation. Or cette définition :

$$(1) e\psi^* \psi dx. dy. dz. = \text{charge électrique contenu dans } dx. dy. dz$$

Est indépendante de la production et de la disparition des paires, puisque ce dernier phénomène n'altère pas la charge totale.

<sup>400</sup> C'est-à-dire le « méson », qui avait été découvert en 1937. Les manifestations attribuées à cette particule, qui était identifiée à la particule prédite en 1935 par Hideki Yukawa dans son modèle de l'interaction entre nucléons, recouvraient en réalité celles de deux particules différentes qui seront par la suite dénommées le muon (particule de spin  $\frac{1}{2}$ ) et le pion (particule de spin 0).

<sup>401</sup> Il conclut son article par : « Enfin, il est intéressant de voir de quelle manière le spin s'introduit dans ces théories vectorielles et l'importance qu'y acquièrent les *densités* ; la transposition de la théorie précédente en langage d'opérateurs est extrêmement instructive à cet égard. »

Donc l'interprétation (1) a un sens bien précis, universellement adoptée aujourd'hui ; pour cette raison, les travaux récents concernant les particules élémentaires ne font plus appel qu'aux notions continues de charge<sup>402</sup>, etc., sans passer par les intermédiaires discontinues ou de probabilités, mentionnées jusqu'ici<sup>403</sup>. »

Proca indique alors que le schéma probabiliste de la mécanique ondulatoire peut cependant se maintenir en relativité (les coefficients devant les fonctions d'onde propre des grandeurs physiques comme l'énergie, etc., conservent leur interprétation probabiliste), mais à la seule condition de ne plus faire référence à la notion de densité de probabilité de présence, et de la remplacer par la notion de densité de charge. Ce texte tend à montrer que Proca ne percevait pas alors la nécessité de recourir à d'autres types de description que celui apporté par le formalisme de la mécanique ondulatoire tridimensionnelle<sup>404</sup> dans le phénomène de création et d'annihilation de particules, et on peut y voir la principale raison pour laquelle il n'a pas cherché à quantifier sa théorie<sup>405</sup>.

Son travail cependant n'en constitue pas moins la base – aujourd'hui considérée comme correcte - d'une théorie générale des particules à spin 1.

Pour conclure, l'appropriation de la mécanique quantique par Proca peut-être caractérisée par des approches formelles sur des problèmes fondamentaux de particules élémentaires, souvent très éloignés de l'expérience ; une grande maîtrise mathématique mais des interprétations physiques du formalisme souvent originales et parfois peu explicites. On ne décèle pas forcément dans son style de recherche les fondements d'une tradition plus pragmatique d'utilisation de la mécanique quantique qui serait à la base de l'école de physique théorique d'après-guerre. Bien entendu, la contribution de Proca à cette école est bien réelle, mais elle se situe sur un tout autre plan, comme nous le verrons.

d) Louis Goldstein : de la physique atomique et à la physique nucléaire, une mécanique quantique appliquée

Après Solomon et Proca, Goldstein est la troisième principale personnalité de la nouvelle génération de physiciens français qui émerge au début des années 1930. À l'instar des deux premiers, il a la caractéristique de ne pas se situer complètement au sein du cercle d'influence de Louis de Broglie, même si des remerciements réguliers adressés à celui-ci à la fin de ses articles attestent de l'existence d'échanges scientifiques entre ces deux hommes. C'est aussi et surtout la personnalité la moins connue, ce qui est assez surprenant en tenant compte de sa très grande productivité.

Louis Goldstein soutient une thèse au début de 1932 à la Sorbonne sur « la théorie quantique des chocs d'électrons inélastiques », thèse qui est la première dont Louis de Broglie ait été membre du jury. Il commence cependant à publier dans le *Journal de physique et le radium* dès 1929. Ses

---

<sup>402</sup> Ce constat est étrange, car la quantité de charge présente dans n'importe quel volume est nécessairement discrète, ce qui est d'ailleurs le cas d'après (1) à la seule condition de considérer  $\psi$  et  $\psi^*$  comme des opérateurs, c'est-à-dire de quantifier le champ.

<sup>403</sup> Archives de l'Académie des sciences (Fonds Proca / Boîte 24bis) Proca (1942).

<sup>404</sup> La méthode des champs self-consistants, à partir de laquelle Dirac avait pu entreprendre une première approximation de la polarisabilité du vide quantique, demeure elle-même dans le cadre conceptuel d'une mécanique ondulatoire tridimensionnelle, mais il s'agit d'une approche fondamentalement approximative.

<sup>405</sup> Ceci est en réalité assez difficile à comprendre puisque l'on trouve par ailleurs dans ses archives (Fonds Proca / Boîte 24bis) Proca (1938), un manuscrit datant de 1938 où il fait référence à la procédure de quantification des champs.

premiers articles portent sur l'application de la théorie de Dirac à la physique atomique<sup>406</sup> avant de se tourner vers l'application de la mécanique ondulatoire à la physique moléculaire<sup>407</sup>. Goldstein affiche dès cette période son style de recherche : application des théories déjà en place à des problèmes physiques concrets, discussion de méthodes de calcul, développement de ces calculs jusqu'à leur terme et comparaison des résultats théoriques avec les données expérimentales. Nous avons déjà plus ou moins rencontré ce genre d'approche dans certains articles de Brillouin et de Solomon, mais le contact avec les données expérimentales se fait ici beaucoup plus étroitement, Goldstein n'hésitant pas à rentrer dans des discussions sur le travail des expérimentateurs. Il s'agit en somme d'une physique qui nécessite la maîtrise des méthodes de résolutions des équations d'onde (notamment celle de Schrödinger et celle de Dirac), des méthodes d'approximation dans différents contextes, en vue d'obtenir les valeurs des niveaux d'énergie des atomes ou des molécules ainsi que celles d'un ensemble de grandeurs pour lesquelles une comparaison avec l'expérience peut se faire assez directement.

Goldstein se lancera ensuite dans un programme de recherche consistant à calculer le champ électromagnétique (considéré comme un champ classique) produit par les atomes selon leurs états (les sources de champs étant les densités électriques  $e\psi^*\psi$  définies à partir des spineurs de Dirac), puis étudiera le problème de l'énergie d'échange dans les systèmes à de nombreux électrons<sup>408</sup>.

Il se lancera enfin à partir de la fin de l'année 1936 dans l'étude théorique des processus d'émissions et de collisions nucléaires<sup>409</sup>. Son premier article sur ce sujet est une tentative de perfectionnement du modèle de Gamow-Condon-Gurney<sup>410</sup> de l'émission  $\alpha$  par une prise en compte de la taille finie de la particule  $\alpha$ . Il se concentrera ensuite sur l'étude des émissions nucléaires des noyaux lourds en se positionnant cette fois dans le cadre du modèle statistique du gaz nucléaire, le noyau étant alors considéré comme un gaz de protons et de neutrons obéissant à la statistique de Fermi. Ce modèle semi-quantique et semi-empirique nécessairement approximatif permet d'obtenir une image simple du processus d'émissions nucléaires, considéré alors comme un processus d'évaporation, assez analogue au processus d'émission thermoïonique. Il permet en conséquence une obtention rapide de certaines grandeurs comme la probabilité d'émission des corpuscules par le noyau mère.

Ce type de modèles est ici jugé par rapport aux services qu'il peut rendre. Il n'est ici pas question de prétendre que l'on peut atteindre avec ce type d'approches une image réaliste des processus nucléaires. Des modèles plus sophistiqués sont d'ailleurs déjà disponibles à l'époque, comme le modèle de la goutte liquide ou le modèle en couche. Mais la fonction avant tout exploratrice du modèle justifie que le théoricien choisisse la plus grande simplicité possible du moment où le modèle exhibe les propriétés du système physique qu'il cherche à mettre en évidence.

---

<sup>406</sup> Goldstein (1929) et Goldstein (1930).

<sup>407</sup> Goldstein (1933-A) et Goldstein (1933-B).

<sup>408</sup> L'énergie d'échange est un terme qui intervient dans la correction des niveaux d'énergies des électrons dans la théorie des perturbations d'un système d'électrons interagissant entre eux. Son origine purement quantique provient de l'indiscernabilité des particules : le terme de perturbation en question couple deux états pour lesquels deux électrons ont échangé leur place, d'où le terme « énergie d'échange ».

<sup>409</sup> Goldstein (1936).

<sup>410</sup> Pour rappel, ce modèle est une des premières tentatives d'application de la mécanique ondulatoire au noyau. Il consiste à décrire la particule *alpha* comme préexistante à l'intérieur du noyau dans lequel elle subit un potentiel qui est la somme d'un potentiel coulombien répulsif et d'un potentiel nucléaire. En raison de la forme de ce potentiel effectif, la particule *alpha* possède des modes propres pour lesquels un effet tunnel peut se produire.

L'approche de Goldstein ne nécessite pas forcément un esprit très spéculatif, et il est frappant de constater qu'il introduit très peu d'hypothèses dans ses travaux (le contraste avec Proca ou Louis de Broglie est très net à cet égard). L'art du théoricien consiste ici non pas à affronter les grands problèmes de principes de la physique moderne, mais, à appliquer des modèles et des théories déjà bien éprouvés à des domaines où leur validité peut être considérée comme acquise, au moins en première approximation.

#### e) Walter Elsasser, physicien nucléaire

Elsasser est le seul étranger de cette série de présentations (il est présent en France de 1933 à 1935, année durant laquelle il part pour les États-Unis), mais sa place se justifie par sa productivité dans le *Journal de Physique* (5 contributions utilisant la mécanique quantique dans les années 1930), par la qualité de ses contributions (Elsasser est notamment le précurseur du modèle en couches du noyau, et donc l'auteur d'un des travaux quantiques les plus importants réalisés en France pendant les années 1930) et par le fait qu'il représente une composante, minoritaire, des travaux quantiques français : l'application de la mécanique ondulatoire à la modélisation du noyau.

Contrairement à la plupart des théoriciens français de la décennie, ce qui structure l'œuvre d'Elsasser n'est pas la mobilisation systématique du cadre théorique quantique mais l'intérêt constant porté au même objet physique : le noyau atomique. Dit autrement, Elsasser apparaît durant la décennie avant tout comme un physicien nucléaire, alors que les autres sont des physiciens théoriciens généralistes (bien que ce genre de spécialisation sur un objet physique commence également à apparaître dans l'œuvre de Léon Brillouin, à propos de la théorie des solides, à partir de 1930, et dans celle de Louis Goldstein, à propos également de la théorie du noyau, à partir de la fin de la décennie). Elsasser justifie ainsi son choix vers cette thématique de recherche :

« Since it was clear enough that Joliot was the moving spirit, and to all appearances the only one who had brought me to Paris, I made it my business to specialize in the structure and dynamics of atomic nuclei. Not that I had a unique passion for this subject, but it seemed the proper thing to do, and, in fact, the transition from the kind of research I had done before, to the application of quantum mechanics in the nucleus, was achieved readily enough<sup>411</sup>. »

Je serai bref sur la présentation de ses travaux, son style de recherche se rapprochant très fortement de celui de Goldstein. Je me focaliserai uniquement sur sa contribution majeure, qui est bien sûr la création du modèle en couches du noyau<sup>412</sup>, qui sera concurrencée à la fin des années 1930 par le modèle de la goutte liquide avant de refaire surface à la fin des années 1940 avec les travaux de Wigner, Mayer et Jensen (qui leur valurent le prix Nobel). Cette contribution est un excellent exemple de la manière dont des données empiriques peuvent être intégrées à des considérations quantiques purement théoriques afin de mener à une idée crédible de la structure des noyaux. Ce travail part de l'analyse des données expérimentales relatives aux masses des différents noyaux, qui semblent invalider le modèle de Gamow de composition des noyaux lourds par des particules *alpha*. Le noyau du béryllium venait par exemple d'être mesuré à 9,0155 unités de masse atomique, soit un poids

---

<sup>411</sup> Elsasser (1978), p. 166.

<sup>412</sup> Elsasser (1933).



inférieur à la somme de deux noyaux d'hélium (mesuré alors à 4,0021) et un neutron (dont la masse estimée par Chadwick était à 1,0067). Or, le poids d'un système composé de plusieurs sous-systèmes liés devant être inférieur à la somme des poids de ces sous-systèmes<sup>413</sup>, on devrait s'attendre à un résultat inverse si le noyau du béryllium était composé de deux noyaux d'hélium et d'un neutron. Le modèle d'Elsasser part donc du principe que les différents noyaux sont formés par des neutrons et des protons qui ne sont pas groupés en noyau d'hélium. Les données des masses des différents noyaux permettent d'autre part d'avoir accès à leur énergie de liaison<sup>414</sup>. Ces données montrent que ces liaisons sont particulièrement élevées pour certains noyaux. Or, un phénomène similaire se produit pour les électrons atomiques, expliquant ainsi les propriétés chimiques des différents atomes. Dans les atomes, les électrons se répartissent en couches de niveaux d'énergie, les atomes les plus stables étant ceux pour lesquels toutes les couches occupées sont complètes. Elsasser estime qu'un tel schéma en couches doit également exister dans les noyaux, les neutrons et les protons se répartissant (indépendamment) dans les différentes couches, formant ainsi des noyaux particulièrement stables lorsque les couches protoniques et neutroniques sont complètes. Le modèle d'Elsasser consiste à calculer les fonctions d'onde des différents états d'un nucléon dans un potentiel nucléaire extrêmement simplifié (en forme de pot ; les fonctions d'onde sont alors les fonctions de Bessel) et de répartir les nucléons dans les différents états. Il parvient ainsi à rendre compte qualitativement du fait que certains noyaux ont une stabilité très grande, même s'il faudra attendre les raffinements de ce modèle à partir de la fin des années 1940 pour pouvoir retrouver ce qui sera alors nommé « les nombres magiques<sup>415</sup> ».

Bien qu'étant, comme la très grande majorité des théoriciens de l'époque, institutionnellement rattaché à l'IHP, Elsasser ne semble pas avoir eu beaucoup d'échanges intellectuels avec les membres du groupe de Louis de Broglie. Ses références bibliographiques, très internationales, ne contiennent que très peu de références à ce groupe. Elsasser raconte ainsi un des rares entretiens qu'il a eu avec Louis de Broglie :

« After I had written my first note, I went to Louis de Broglie, who was closest to my own interests and who, as a member of the Academy, could submit it in my behalf. He told me that he had not the slightest wish to read my manuscript.»<sup>416</sup>.

Elsasser a été proche en revanche du groupe Langevin-Joliot-Perrin, collaborant avec Francis Perrin à l'écriture d'un article, et étant sans doute en discussion avec les membres du laboratoire des Curie - auquel il se sentait d'ailleurs rattaché - en adoptant un rôle de théoricien du laboratoire :

« I felt that I was under a strong moral obligation to work on whatever was most useful to the Radium Institute<sup>417</sup> ».

f) Jean-Louis Destouches, entre physique, mathématique et philosophie

Jean-Louis Destouches fut sans doute l'élève le plus influent de Louis de Broglie. Il fut également l'un des premiers. Personnage à l'initiative du séminaire Louis de Broglie<sup>418</sup>, il eut très tôt

<sup>413</sup> L'énergie de liaison étant négative.

<sup>414</sup> Il suffit de soustraire la masse du système formé à la somme des masses des sous-systèmes.

<sup>415</sup> Nombres de protons et de neutrons pour lesquels les noyaux sont particulièrement stables.

<sup>416</sup> Elsasser (1978), p. 187.

<sup>417</sup> Elsasser (1978), p. 169.

lui-même des élèves et fut un des très rares théoriciens de sa génération en France à pouvoir accéder à un poste de professeur titulaire à la Sorbonne. Nous reviendrons ultérieurement et plus en détails sur la carrière de ce personnage important et nous nous concentrons ici sur son œuvre purement scientifique<sup>419</sup>.

Même s'il fut une des personnalités les plus proches de Louis de Broglie, la physique théorique pratiquée par Destouches n'en est pas moins extrêmement différente de celle de son mentor. Initié aux grands problèmes de la microphysique par les premiers cours et le séminaire de Louis de Broglie, Destouches subit également les influences d'autres professeurs de la Sorbonne - cette fois-ci mathématiciens - Emile Borel et Maurice Fréchet. Il consacre sa thèse de doctorat<sup>420</sup> à la théorie de la « superquantification », autrement dit, à la seconde quantification, qu'il soutient en 1933, et a ainsi le loisir de mesurer les difficultés auxquelles se heurte la physique quantique relativiste de l'époque. Ses premières contributions au *Journal de physique et le radium* posent déjà son style de recherche : une manière axiomatique de théoriser la physique, en prenant grand soin de définir rigoureusement les concepts employés, et s'intéressant à des sujets assez éloignés des principales préoccupations des physiciens de l'époque, comme le montre d'ailleurs l'extrême pauvreté de sa bibliographie. Le nombre de référence dans ces articles du *Journal de Physique* est souvent nul et ne dépasse jamais le chiffre de 5. Et encore, les quelques références concernent des articles ou des ouvrages purement mathématiques, des grands classiques des pères fondateurs de la mécanique quantique (Bohr, Heisenberg ou Dirac) ou des documents écrits dans l'entourage de Louis de Broglie.

Ses premiers articles<sup>421</sup> portent par exemple sur la définition du centre de gravité d'un système de corpuscules en mécanique ondulatoire. En tentant ainsi d'explorer le sens et les propriétés que peuvent avoir des notions bien connues de mécanique classique à l'intérieur du cadre de la mécanique ondulatoire, Destouches cherche ici surtout à explorer les rapports formels entre les deux mécaniques. Un résultat qu'il parvient à démontrer trouvera effectivement une application importante dans le travail de son mentor Louis de Broglie. Jean-Louis Destouches montre en effet que le centre de gravité d'un système de corpuscules se comporte en mécanique ondulatoire de la même façon qu'un point matériel dont la masse serait la somme des masses des particules constituant le système, et obéit donc à une équation d'onde de Schrödinger dans l'espace à trois dimensions. Or, ce résultat sera vu, par la suite, comme une indication forte de la pertinence du procédé de « fusion » que Louis de Broglie met en place, tout d'abord dans sa mécanique ondulatoire du photon, puis dans sa théorie générale des particules à spin : des équations d'ondes qui se propagent dans un espace à trois dimensions dont les coordonnées représentent le centre de gravité d'une particule composée. Jean-Louis Destouches participera donc à ce programme de recherche initié par la mécanique ondulatoire du photon de Louis de Broglie qui rencontre un engouement relatif, notamment mais pas uniquement parmi ses élèves<sup>422</sup>, de la fin des années 1930 au début des années 1950, et qui propose une tentative d'unification de la description théorique des particules alternative à la théorie quantique des champs.

---

<sup>418</sup> Destouches (1953), pp. 67-85.

<sup>419</sup> Pour d'autres analyses de son œuvre scientifique, voir Barreau, Février, Lochak (1994) et Bitbol (2001).

<sup>420</sup> Destouches (1933).

<sup>421</sup> Destouches (1934) et Destouches (1935).

<sup>422</sup> Ce programme de recherche trouvera également un écho dans le travail de physiciens étrangers appartenant à des pays de second plan au niveau scientifique (par exemple les travaux du Belge Jules Geheniau qui sera un des contributeurs majeurs de ce programme de recherche, mais également les travaux du roumain J.J. Placinteanu, ou encore ceux de l'Égyptien M. El-Nadi).

Mais à partir de la seconde moitié des années 1930, Jean-Louis Destouches va prendre du recul par rapport aux développements de la physique quantique relativiste pour dégager les règles générales auxquelles celles-ci doivent se soumettre. C'est ce qu'il commence à entreprendre dès 1936 dans un article dans lequel il tente de trouver les « lois générales d'évolution d'un système physique »<sup>423</sup>. Nous nous arrêtons un petit moment sur cet article qui est très représentatif des travaux de Jean-Louis Destouches et qui possède donc une grande valeur d'illustration.

Comme l'indique Destouches dans le sommaire, l'article « a pour but de mettre en évidence les conditions auxquelles doit satisfaire toute théorie de l'évolution d'un système physique, puis d'examiner des conditions supplémentaires qu'on peut adjoindre ». En toile de fond de cette réflexion : les problèmes auxquels se heurtent les tentatives d'incorporer la relativité au sein des théories quantiques. Mais réservant la question brûlante de la relativité à une étude ultérieure, Destouches tente ici tout d'abord de revisiter le concept même d'une théorie gouvernant l'évolution d'un système microphysique.

Cette entreprise commence par la définition d'un certain nombre d'éléments du formalisme jouant chacun un rôle opératoire bien précis. Tout d'abord, un système microphysique est défini par un nombre défini de particules<sup>424</sup> sur lesquelles un observateur pourra entreprendre de faire des mesures. Ces mesures sont soit complètes (aboutissant au maximum d'information susceptible d'être fourni par le système), soit incomplètes. Par convention, le résultat d'une mesure complète est dit « caractériser l'état du système »<sup>425</sup>. À un état caractérisé à un instant  $t_0$  correspond un élément formel de la théorie  $X_0$  appartenant à un ensemble  $\chi_0$ . Du caractère macroscopique de l'appareil de mesure découle le fait que le résultat de l'observation devra se traduire par un nombre associé à une grandeur de la physique macroscopique, c'est-à-dire par une grandeur classique<sup>426</sup> : il ne peut donc y avoir plus de grandeurs caractérisant l'état du système qu'il n'y a de grandeurs classiques<sup>427</sup>. Ces grandeurs sont traduites formellement par les éléments  $A, B, \dots$ , et les éléments représentant l'état du système au temps  $t_0$  par rapport à chacune de ces grandeurs appartiendront aux ensembles  $\chi_{0A}, \chi_{0B} \dots$  dont la réunion formera l'ensemble  $\chi_0$ . Une mesure complète de la grandeur  $A$  au temps  $t_0$  aboutira à l'obtention des valeurs  $a_1, \dots, a_n$  caractérisant chacune des  $n$  particules du système, et appartenant aux ensembles  $A_{1,t_0}, \dots, A_{n,t_0}$ . Les éléments  $X_0$  appartenant à l'ensemble  $\chi_{0A}$  seront donc des fonctions des  $n$  nombres  $a_1, \dots, a_n$ .

Une loi d'évolution d'un système physique est alors définie comme devant permettre de faire des prévisions sur une mesure effectuée à un temps  $t$ , à partir des résultats de mesures effectuées à un temps antérieur  $t_0$ . Formellement, cela se traduit par le fait que la théorie doit contenir un élément  $X(t,$

<sup>423</sup> Destouches (1936).

<sup>424</sup> Destouches n'ignore pas le problème de création et d'annihilation des particules, mais il reprend à son compte la stratégie de Dirac-de Broglie d'un réservoir de particules inobservables dans un état d'annihilation. Le nombre total de particules peut ainsi être considéré comme constant.

<sup>425</sup> Destouches prend ici donc bien garde de ne pas attribuer une signification ontologique à l'état du système. Même s'il fait remarquer que l'on peut supposer que le résultat de la mesure est causé par l'existence d'un système sous-jacent se trouvant dans un certain état, la précaution qu'il prend par l'emploi du terme « par convention » montre que Destouches ne s'engage pas sur une interprétation ontologique de la notion d'état. L'état caractérise juste ici le résultat d'une mesure.

<sup>426</sup> Destouches reprend ici implicitement le raisonnement de Bohr - tout en le précisant et le formalisant - qui consiste à affirmer le maintien du langage classique dans la description des phénomènes dont traite la microphysique. Plus généralement, le grand intérêt des travaux de Destouches est d'avoir formalisé rigoureusement certaines intuitions bohriennes qui étaient jusqu'alors souvent énoncées de manière qualitative.

<sup>427</sup> Cet énoncé n'est cependant pas tout à fait exact. Par exemple, le spin n'est pas une grandeur classique. Même si on peut à la limite la rattacher de manière générale à la grandeur « moment cinétique », d'autres grandeurs qui feront leur apparition dans des théories quantiques n'ont quant à elles aucun équivalent classique : par exemple la « couleur » des quarks et des gluons, la parité, l'hypercharge, etc...

$t_0, X_0$  ) permettant de faire de telles prédictions à partir de ces résultats. La loi physique d'évolution pourra alors se traduire de manière générale par la transformation de  $X_0$  en  $X(t, t_0, X_0)$  par l'application d'un opérateur  $U(t_0, t)$  sur l'élément  $X_0$  :

$$(*) X(t, t_0, X_0) = U(t_0, t)X_0$$

pour laquelle, pour des raisons évidentes<sup>428</sup>,  $U(t_0, t)$  se réduit à l'identité si  $t = t_0$ .

Destouches formalise alors toutes ces considérations (plus quelques autres subtilités que l'on passe ici sous silence) sous forme axiomatique, en posant notamment 7 postulats et 4 définitions. Il déduit alors les propriétés mathématiques des différents éléments du formalisme en fonction du type de prédiction que permet la loi d'évolution (\*)<sup>429</sup>.

Le théorème fondamental auquel parvient Destouches est alors le suivant :

« Lorsque l'évolution est telle que les opérateurs sont différentiables et forment un groupe l'évolution du système est déterminée par une équation différentielle linéaire abstraite du premier ordre sans second membre.

De cette équation différentielle entre opérateurs on passe à une équation en  $X$  dans laquelle l'élément  $X_0$  ne figure plus :

$$\frac{dX}{dt} = \mathcal{H}(t)X$$

».

Cette équation est, bien entendu, une équation de type de celle de Schrödinger en mécanique ondulatoire, indication pour Destouches que l'on peut démontrer « qu'on peut édifier une mécanique ondulatoire relativiste des systèmes », entreprise qu'il se propose d'accomplir lors de travaux ultérieurs.

Comme l'explique Michel Bitbol, Destouches adopte pour la suite de sa carrière cette même « attitude constante » que notre discussion précédente a permis d'illustrer :

« suivre de près l'évolution des théories physiques, mais n'y participer qu'au deuxième degré, en cherchant à dégager les règles générales de leur formation, les lois qui régissent leurs relations mutuelles, ou les théorèmes qui valent pour un grand nombre d'entre elles parce qu'ils découlent d'un fond commun d'hypothèses parfois tacites<sup>430</sup> ».

Suivant le programme de recherche fixé précédemment, Destouches appliquera sa méthode axiomatique en incorporant les contraintes que le principe de relativité restreinte impose aux théories physiques :

<sup>428</sup> Les prédictions que l'on peut faire sur une mesure effectuée instantanément après la première mesure doivent correspondre à l'état caractérisé par cette première mesure.

<sup>429</sup> Destouches démontre par exemple que, si l'évolution est régulière, à caractère biunivoque (au résultat de mesure à l'instant  $t_0$  correspond un seul élément de prédiction des résultats que l'on peut obtenir à l'instant  $t$  et, réciproquement, à cet élément de prédiction correspond un seul résultat de mesure à l'instant  $t_0$ ) et permet de faire avec une probabilité de 1 certaines prédictions sur le résultat de la mesure à l'instant  $t$  à partir de la connaissance du résultat à l'instant  $t_0$ , alors les éléments  $U(t_0, t)$  forment un groupe.

<sup>430</sup> Bitbol (2001) p. 8.

« Postulat de relativité de l'évolution d'un système physique. —Les lois d'évolution d'un système physique déterminé apparaissent les mêmes pour tout observateur en mouvement rectiligne uniforme par rapport au système de référence stellaire<sup>431</sup> »

Destouches remarque que ce postulat n'est pas contraignant vis-à-vis des lois générales d'évolution d'un système, mais conditionne en revanche la coordination des informations que peuvent s'échanger deux observateurs en translation uniforme l'un par rapport à l'autre. Le passage d'une théorie non-relativiste à une théorie relativiste correspond alors, en employant les termes de Destouches, au passage d'une physique du solitaire à une physique collective, termes qui correspondent aux sous-titres de deux des trois tomes d'un ouvrage qu'il consacre aux *Principes fondamentaux de la physique théorique*<sup>432</sup>.

Davantage travail d'un théoricien de la physique théorique que d'un physicien théoricien, l'œuvre de Destouches — qui deviendra également *docteur ès lettres* après avoir soutenu une seconde thèse sur l'épistémologie de la physique en 1938 —, ainsi que celui de sa complice intellectuelle Paulette Février, contribuera beaucoup à renforcer le sentiment de l'existence d'une coupure nette entre physique théorique et physique expérimentale en France, et deviendra le symbole même de l'incompréhension entre la génération de théoriciens d'après-guerre et l'ancienne physique théorique française représentée par Louis de Broglie dont le style de recherche et les options intellectuelles sont pourtant très différents.

g) Gérard Petiau, une puissance mathématique au service des idées physiques de Louis de Broglie

Gérard Petiau naît à Paris en 1911. Après l'obtention d'une licence de physique et d'un diplôme d'études supérieures de physique mathématique à la Faculté des sciences de Paris (1931-1933), Petiau rejoint la sphère d'influence de Louis de Broglie et passe une thèse portant sur « les équations d'onde corpusculaire » en 1936<sup>433</sup>.

Petiau résume lui-même ainsi son œuvre scientifique :

« D'une façon générale, l'ensemble de mes recherches a été consacré à l'étude des équations d'ondes relativistes de corpuscules à spin en m'inspirant des idées nouvelles introduites en physique par M. Louis de Broglie dans ses différents ouvrages et notamment sa théorie de la lumière<sup>434</sup> ».

De l'estime et de la sympathie que Louis de Broglie avait à son égard, on peut se faire une idée grâce à la lettre suivante datant de 1942 :

« Mon cher ami,

J'ai reçu ces jours-ci la visite d'un monsieur qui s'intéresse à la Physique théorique et à ceux qui la cultivent. Après m'avoir demandé de ne pas divulguer son nom, il m'a remis une somme de cinq mille francs en me chargeant d'en faire bénéficier celui de mes élèves qui, compte tenu de la valeur de

---

<sup>431</sup> Destouches (1936-B).

<sup>432</sup> Destouches (1943).

<sup>433</sup> Archives personnelles de Gérard Petiau (1950). Il devient également licencié de droit la même année.

<sup>434</sup> *Ibid.*

ses travaux et de sa situation de famille, me paraissait le plus désigné pour profiter de cette libéralité<sup>435</sup>. Il m'a semblé que c'est à vous que je devais remettre cette somme. Si vous voulez bien venir en parler en particulier dans mon bureau à l'Institut Henri Poincaré au début de la semaine prochaine, je vous remettrai les 5 000 francs qui m'ont été confiés.

Croyez, mon cher ami, à mes sentiments amicaux dévoués,  
Louis de Broglie<sup>436</sup> ».

La principale contribution de Petiau à la physique théorique du XX<sup>e</sup> siècle est présente dans sa thèse de 1936. Petiau se situe résolument au sein du cadre conceptuel de broglie de la mécanique ondulatoire du photon, qui, comme il le dira en 1950, suit selon lui « la réalité physique de beaucoup plus près que ne le fait la théorie quantique des champs développée concurremment par les auteurs anglo-saxons<sup>437</sup> ». Mais l'approche de Petiau est plus mathématique, plus algébrique que ne l'est celle de Louis de Broglie. Le formalisme pour lequel Petiau a inscrit son nom dans l'histoire de la physique mésonique illustre très bien cet aspect. Nous avons vu la manière avec laquelle Louis de Broglie a dérivé son équation d'onde du photon : il s'agissait essentiellement de postuler une constitution neutrinienne de la lumière, de poser les deux équations d'ondes auxquelles devaient obéir le neutrino et l'anti-neutrino, et de « fusionner » les deux équations. Par la méthode de fusion, de nouvelles matrices étaient alors obtenues, à partir desquelles on pouvait déduire les valeurs propres du spin du photon. La méthode de Gérard Petiau, quant à elle, n'a pas besoin d'introduire d'hypothèses quant à la nature du photon (bien que par ailleurs, Petiau se réclame de la théorie neutrinienne de la lumière). Reprenant le raisonnement par lequel Dirac a obtenu son équation pour les particules de spin 1/2, elle consiste essentiellement à postuler pour le photon une équation de la même forme que celle de Dirac :

$$(*) \left( \sum_{j=1,2,3,4} \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x^j} \Gamma^j + imc^2 \right) \phi = 0,$$

mais en outre à poser pour les matrices  $\Gamma_j$  de nouvelles relations ( $\Gamma^\mu \Gamma^\nu \Gamma^\rho + \Gamma^\rho \Gamma^\nu \Gamma^\mu = \Gamma^\mu \delta^{\nu\rho} + \Gamma^\rho \delta^{\nu\mu}$ ), à partir desquelles de nouvelles propriétés de spin découlent. Petiau montre alors qu'en choisissant une représentation particulière pour les  $\Gamma^\mu$ , on retombe sur l'équation d'onde du photon de Louis de Broglie. En somme, les réflexions de Petiau sont d'avantage centrées sur l'algèbre des matrices  $\Gamma^\mu$  que sur les considérations physiques concernant la constitution du photon.

Cette étude est à la base du formalisme qui sera connu sous le nom de l'algèbre de Duffin-Kemmer-Petiau, qui trouvera un champ d'application fécond en physique mésonique et qui est encore utilisé aujourd'hui.

Nous retrouvons cette approche mathématisante dans les articles écrits par Petiau dans le *Journal de Physique*<sup>438</sup>. Bien qu'obtenant sa thèse en 1936, Petiau devient vraiment productif seulement à partir de 1938. Trois de ses quatre articles de la fin de cette décennie seront consacrés à

<sup>435</sup> À titre de comparaison, nous savons que la bourse de recherche versée à Petiau par la Caisse nationale des sciences en 1938 s'élevait à 24 000 francs.

<sup>436</sup> Lettre de Louis de Broglie à Gérard Petiau datant du 28 Novembre 1942, très aimablement communiqué sous forme numérisée par son fils Pierre Petiau. Pour ce dernier, il ne fait aucun doute que cette lettre a été une façon très délicate pour Louis de Broglie de tenter de fournir une aide financière personnelle à son élève.

<sup>437</sup> Archives personnelles de Gérard Petiau (1950).

<sup>438</sup> Son premier article dans le *Journal de physique*, portant sur une discussion de la nature des constituants du noyau et de ses modes de désintégration, et dans lequel les seules équations écrites sont celles des réactions nucléaires, fait cependant exception (G. Petiau, « Sur la théorie des transformations nucléaires et la classification des éléments légers », Vol. 5 No. 8 (août 1934)).



des discussions à propos de la forme générale des équations d'ondes de Dirac<sup>439</sup> et de Louis de Broglie<sup>440</sup>, exprimées indépendamment des représentations choisies (c'est-à-dire indépendamment de l'explicitation des matrices qui apparaissent dans les équations), ainsi qu'à propos de l'expression des différentes grandeurs qui leur sont associées. Le quatrième article est quant à lui un prolongement de réflexions issues de sa thèse à propos des équations d'ondes du type (\*). Dans tous les cas, les considérations strictement physiques demeurent minimalistes et la discussion se cantonne souvent aux aspects mathématiques.

Il est hors de doute que le profil de Gérard Petiau pouvait séduire Louis de Broglie par sa nature complémentaire du sien. En s'engageant dans la voie de la mécanique ondulatoire du photon, Louis de Broglie devait composer avec une théorie dont le formalisme mathématique est assez lourd, ce qui ne favorisait pas forcément ses qualités. De Broglie le reconnaît lui-même, lorsqu'il indique en 1957 dans la préface d'un ouvrage consacré à cette théorie « avoir profité de [ses] échanges de vues avec les jeunes théoriciens de l'Institut Henri Poincaré, et surtout avec Mme M.A. Tonnelat et M. Gérard Petiau, qui ont apporté dans ces dernières années à ce genre de questions de très précieuses contributions<sup>441</sup> ». Lorsque l'on regarde en détail, on s'aperçoit effectivement que beaucoup des résultats de la théorie nécessitant un développement mathématique important sont l'œuvre de ces deux physiciens ou de Jules Géhéniau. On peut dès lors se poser la question de savoir dans quelle mesure l'hégémonie intellectuelle des idées de brogliennes sur de tels physiciens a pu brider leur carrière. Il s'agit d'une question que beaucoup de physiciens contemporains se posent, mais il me semble que l'angle sous lequel elle est abordée est biaisé par une illusion rétrospective. C'est par exemple oublier que dans le contexte des années 1930, le programme de recherche entrepris par Louis de Broglie bénéficiait d'une crédibilité et d'une légitimité tout à fait respectables, et que son principal concurrent, la théorie quantique des champs, ne faisait pas l'unanimité. La théorie de Louis de Broglie était par exemple discutée avec beaucoup d'intérêt – et il est vrai avec beaucoup de sens critique – par Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, ou Hendrick Kramers. Dès 1934, Pauli signale à Heisenberg l'existence de ce « plutôt intéressant » travail de Louis de Broglie<sup>442</sup>. Encore en 1939, il discute de cette théorie avec Jules Géhéniau<sup>443</sup> et Alexandre Proca<sup>444</sup>. Il signale notamment à ce dernier qu'il ne veut pas accepter que la masse du photon diffère de zéro, mais qu'il voudrait toutefois interpréter d'une manière différente les équations de sa « théorie du photon ». Quant à Heisenberg, il indique encore en 1953 que « cette idée que le quantum de lumière est aussi un système composé, a, ces dernières années, vu croître sa probabilité d'être justifiée grâce à la découverte de nombreuses nouvelles particules élémentaires<sup>445</sup> » et ajoute qu'« en faveur de cette conception militent des arguments généraux de poids<sup>446</sup> ». Au total, le crédit scientifique d'une telle théorie était alors suffisant pour la rendre légitimement attractive pour de jeunes chercheurs. Le fait qu'un programme de recherche ne débouche pas sur des résultats probants est somme toute un aspect inévitable et tout à fait normal du processus de recherche scientifique<sup>447</sup>.

---

<sup>439</sup> Petiau (1938).

<sup>440</sup> Petiau (1939).

<sup>441</sup> De Broglie (1957), préface p. vi.

<sup>442</sup> Lettre de Pauli à Heisenberg du 19 janvier 1934, in Pauli (1985), pp. 253-254.

<sup>443</sup> Archives de l'Académie des sciences (42J/boîte 26), Pauli (1939).

<sup>444</sup> Archives de l'Académie des sciences (Fond Proca / dossier « correspondance »), Pauli (1939).

<sup>445</sup> Heisenberg (1953), p. 283.

<sup>446</sup> *Ibid.*, p. 286.

<sup>447</sup> En disant cela, je ne veux pas dire que la mécanique ondulatoire du photon était à cette époque un programme de recherche dont les mérites étaient équivalents à ceux de la théorie quantique des champs. De toutes évidences,

Reste qu'il y avait un inconvénient majeur à se focaliser sur un programme de cette nature, qui s'est principalement développé autour de l'Institut Henri Poincaré : le caractère local de cette entreprise théorique ne favorisait pas l'immersion des chercheurs qui s'y adonnaient à l'intérieur des grands courants théoriques internationaux. Nous retrouvons cet aspect dans les articles de Gérard Petiau, qui, comme ceux de Jean-Louis Destouches, sont faiblement référencés, et le sont par des articles et des ouvrages dont les auteurs appartiennent presque exclusivement à des chercheurs locaux. Nous trouvons ainsi dans les quatre articles mentionnés de Gérard Petiau uniquement des références à des travaux de Louis de Broglie, de Jean-Louis Destouches et d'Alexandre Proca.

#### h) Bernard Kwal, à la recherche de nouveaux formalismes

Mort prématurément (en 1952), ce physicien théoricien est, avec Louis Goldstein, l'un des grands inconnus de sa génération. Bernard Kwal défend sa thèse sur « la Mécanique ondulatoire des corpuscules élémentaires » seulement en 1946, sans doute en partie en raison de sa captivité pendant la seconde guerre mondiale<sup>448</sup>, mais sa carrière scientifique est entamée bien avant, et il est déjà rattaché institutionnellement à l'Institut Henri Poincaré dès les années 1930.

Bernard Kwal peut être considéré comme un des élèves de Louis de Broglie. Bien qu'il n'ait pas participé directement à son programme de recherche sur la mécanique ondulatoire du photon, les remerciements à la fin des articles de Kwal attestent d'une discussion scientifique permanente avec de Broglie. Ce dernier fait également mention d'une correspondance ininterrompue entre lui et Kwal durant sa captivité. Destouches le cite comme l'un des fidèles anciens du séminaire Louis de Broglie<sup>449</sup>. Enfin, Kwal contribuera au livre jubilaire de Louis de Broglie (qui paraît cependant après sa mort) et l'on y apprend qu'il était « l'un des meilleurs élèves de Louis de Broglie<sup>450</sup> ».

Comme ceux des élèves de Louis de Broglie que nous avons examinés jusqu'à maintenant, les travaux de Kwal se caractérisent par leur caractère formel et abstrait. Sa première contribution au *Journal de Physique et le Radium*<sup>451</sup> porte sur une formulation des équations de Maxwell dans le formalisme des quaternions et sa seconde contribution, porte sur les rapports entre « les demi-vecteurs et les tenseurs<sup>452</sup> » et est de nature quasi-exclusivement mathématique.

Kwal réutilise le formalisme des quaternions en 1937, cette fois-ci dans le but de poser les bases d'une véritable mécanique quantique relativiste.<sup>453</sup> Ce difficile mariage entre la théorie de la relativité et la mécanique quantique est un problème qui revient en permanence dans les travaux des théoriciens des années 1930 qui sont impliqués dans des sujets de physique fondamentale. Nous l'avons déjà remarqué en examinant l'œuvre de Proca et de Louis de Broglie, et nous pouvons le constater de nouveau ici. Même si cette thématique existe partout ailleurs, les discussions qu'elle

---

les partisans du premier programme de recherche parvenaient tout juste à rattraper les résultats auxquels étaient parvenus bien avant eux les partisans du second. De plus, le fossé entre le pouvoir heuristique des deux théories ne fera que s'agrandir après la seconde guerre mondiale. Ce que je veux dire ici est simplement qu'il n'était encore pas complètement inenvisageable de soutenir que le premier programme parviendrait à dépasser le second pendant les années 1930.

<sup>448</sup> Archives de l'Académie des sciences (42J/boîte 40), de Broglie (1954).

<sup>449</sup> Destouches (1953).

<sup>450</sup> George (1953), p. x.

<sup>451</sup> Kwal (1934).

<sup>452</sup> Kwal (1936).

<sup>453</sup> Kwal (1937).

entraîne prennent une allure particulière en France du fait que le formalisme de la théorie quantique des champs, qui sera le premier formalisme quantique particulièrement bien adapté à ce problème, est presque complètement absent des développements théoriques français, à l'exception notable des travaux de Jacques Solomon. Kwal identifie dans cet article le problème de la physique quantique relativiste au fait que les coordonnées d'espace et de temps ne sont pas mises sur le même plan : les premières constituent des grandeurs physiques dynamiques quand la dernière n'est qu'un simple paramètre. La solution pour Kwal consiste à utiliser le formalisme des quaternions dès le début de la formulation des lois quantiques. Ce formalisme<sup>454</sup> garantit qu'à chaque étape du développement les grandeurs de types temps et espace soient considérées sur un pied d'égalité. Cette idée conduit Kwal à formuler une mécanique des matrices qui est une généralisation relativiste du formalisme de Born-Jordan-Heisenberg de 1925, dans laquelle chaque matrice est définie de la manière suivante :

$$q = q_{nm} e^{2\pi i (x \cdot \frac{\sqrt{v_{nm}}}{c})}$$

Où  $x$  est le quaternion représentant les coordonnées d'espace-temps et  $\frac{v_{nm}}{c}$  celui représentant le nombre d'onde quadridimensionnel.

Et la définition de la dérivée spatio-temporelle des matrices :

$$\frac{\bar{\partial}}{\partial x} q = \bar{P}q - \bar{q}P$$

Dans laquelle  $P$  est la matrice quaternionnienne énergie-impulsion. Ces deux relations généralisent la définition des matrices d'Heisenberg (dans lesquelles l'expression de la phase est purement temporelle) et les équations du mouvement d'Heisenberg (qui ne font intervenir que le Hamiltonien). En résumé, ce type de formulations permet de considérer les variables spatiales comme des paramètres, au même titre que les grandeurs temporelles. Mais, et Kwal ne le mentionne pas, c'est précisément ce que parvient à faire la théorie quantique des champs. De plus, Kwal définit ensuite une matrice position (en lui donnant un sens quadri-dimensionnel : il s'agit donc de la matrice position dans l'espace-temps) qui respecte avec la matrice  $P$  les relations de non-commutation canoniques, ce qui mène, sans que Kwal ne le mentionne, à au moins deux problèmes de principe. Le premier étant qu'il est assez difficile d'interpréter physiquement par exemple la matrice position selon l'axe  $x$ , qui contiendrait en plus du paramètre temporel habituel, des paramètres spatiaux (quelle signification donner à un opérateur position qui dépend lui-même de la position ?). Le second étant que s'il existait une matrice temps qui serait la matrice conjuguée de la matrice énergie, outre les problèmes d'interprétation d'une telle matrice, il est difficile d'éviter que les valeurs propres de la matrice énergie ne soient pas bornées vers le bas.

---

<sup>454</sup> Un quaternion  $F$  peut être défini ainsi :  $F = Xj_x + Yj_y + Zj_z + T$ , avec  $j_x j_y = j_z$  ;  $j_y j_x = -j_x j_y$  (et permutations circulaires), et  $j_x^2 = j_y^2 = j_z^2 = -1$ .  $\bar{F} = -Xj_x - Yj_y - Zj_z + T$  est alors le quaternion conjugué de  $F$ .

Cet article est un parfait exemple pour illustrer le fait que la non-réception de la théorie quantique des champs en France a eu une importance majeure sur les orientations de recherche de très nombreux théoriciens français qui, s'ils l'avaient acceptée, se seraient sans doute penchés sur des problèmes plus concrets - au lieu de réexaminer sans cesse les fondements de la théorie quantique. Les travaux français ultérieurs à la seconde guerre sur la théorie quantique des champs (parmi lesquels on retrouve des contributions de... Bernard Kwal) n'augmenteront en volume qu'après la seconde guerre mondiale.

i) Jacques Winter et les méthodes de résolution de problèmes

Ce physicien est à ne pas confondre avec son homonyme, né en 1929, qui sera membre du laboratoire Brossel-Kastler.

Jacques Winter débute sa carrière à l'Institut Henri Poincaré, et fait partie des premiers membres du groupe de Louis de Broglie qui se constitue au début des années 1930 autour du séminaire<sup>455</sup>. Il deviendra ensuite maître de conférences à l'école Polytechnique. Il soutient sa thèse portant sur « l'étude théorique de la diffusion des ondes de de Broglie » en 1934.

Winter fait partie des rares élèves de Louis de Broglie à avoir pratiqué une mécanique ondulatoire plutôt appliquée. Contrairement aux différents membres de l'école de Broglienne dont nous avons examiné les travaux jusqu'à maintenant, les travaux de Winter ne se focaliseront pas sur les problèmes fondamentaux de physique quantique relativiste et sur la recherche des équations d'onde des particules élémentaires. Ses travaux se rapprochent davantage de ceux de Léon Brillouin, qui lui a d'ailleurs suggéré quelques sujets de recherches se rapprochant de ses préoccupations.

Proche du théoricien à problème donc, Jacques Winter privilégie cependant une approche un peu plus abstraite et moins tournée vers la prise en compte des résultats expérimentaux que des physiciens comme Louis Goldstein ou Walter Elsasser. Sa première étude<sup>456</sup> publiée dans le *Journal de Physique* illustre bien sa démarche de travail. Elle est consacrée aux équations de Schrödinger dans lesquels le Hamiltonien dépend du temps, et à leurs applications aux phénomènes de résonance. Le niveau de la discussion est d'ordre tout à fait général, même si des illustrations concrètes (notamment empruntées à des problèmes de physique atomique) sont mobilisées. Léon Brillouin lui suggère ensuite de travailler sur la propagation des flux électroniques, thème tout à fait principal dans l'étude des propriétés électroniques des métaux. Mais ici encore, Jacques Winter aborde le problème de manière tout à fait générale en cherchant à dégager les méthodes de résolution d'une classe de problèmes faisant intervenir plusieurs particules obéissant au principe de Pauli et dont les interactions mutuelles sont considérées comme des perturbations. S'ensuivront deux articles sur ce thème de diffusion électronique. La démarche de Winter est explicitée par lui-même au début d'un de ces deux articles :

« But du problème. – Les faits expérimentaux qu'il s'agit d'interpréter sont les phénomènes de diffusion de jets électroniques par les gaz et, notamment, l'effet Ramsauer, qui a été mis en évidence : on a constaté des minima de diffusion, lorsque la vitesse des électrons incidents varie.

---

<sup>455</sup> Destouches (1953).

<sup>456</sup> Winter (1933-A).

Ici, nous nous plaçons **à un point de vue purement mathématique**, et reprenons une question, que les études déjà faites ne traitaient pas rigoureusement : la répartition angulaire des flux diffusés<sup>457</sup> ».

Toujours suivant cette même ligne directrice, Winter produira également dans le *Journal de physique* des articles consacrés à des discussions sur des méthodes d'approximation (approximation de Born, théorie des perturbations de Rayleigh). Winter ne publie plus dans le *Journal de physique* à partir de l'année 1936.

#### j) Discussion

Je voudrais désormais dégager les points importants que me paraissent mettre en évidence ces analyses. La première chose est que parmi les théoriciens quantistes les plus productifs en France, il semble exister une démarcation assez franche entre ce que l'on pourrait appeler des théoriciens à problème et des théoriciens qui s'occupent de sujets plus généraux et fondamentaux. Dans la première catégorie, je place Goldstein, Elsasser, Brillouin et, à un degré moindre, Solomon et Winter, et dans l'autre nous plaçons de Broglie, Proca, Kwal, Petiau et Destouches. Ce qui peut paraître être un équilibre entre deux traditions de recherche ne rend pas compte du fait que la seconde tendance (qui est cependant en réalité très hétérogène) va peser plus lourdement sur l'ambiance globale de la physique théorique en France. En regardant de plus près, on peut constater que les physiciens à problèmes ne sont pas structurés autour d'une grande figure tutélaire (comme c'est le cas pour les autres physiciens – excepté Proca – avec Louis de Broglie). Leurs références bibliographiques sont souvent tournées exclusivement vers l'étranger, indice qu'ils ne sont intégrés à aucune démarche collective en France<sup>458</sup>. Quelques chiffres permettent d'illustrer ce fait : seulement 3% des références bibliographiques de Jacques Solomon concernent des travaux français ; ce chiffre s'élève à 4% pour Léon Brillouin, et respectivement 16% et 21% pour Goldstein et Elsasser, dont la plupart concernent cependant non pas des travaux d'autres théoriciens français mais plutôt des travaux d'expérimentateurs français. Ce même chiffre est de 100% pour Petiau et 61% pour Destouches (sur un nombre total il est vrai beaucoup plus réduit pour ces deux derniers). En remarquant que ce chiffre est plutôt faible pour Proca (19%) et plutôt fort pour Winter (40%), ces différences attestent encore peut-être davantage une démarcation entre les membres du groupe de Louis de Broglie et les « indépendants ».

Cet aspect sur l'ouverture aux travaux étrangers posent la question de leur accessibilité, tant au niveau de la langue qu'au niveau de la possibilité de les consulter. Jean Langevin indique que cet aspect n'était pas réellement un problème en France<sup>459</sup>. Les documents étrangers étaient achetés par les laboratoires ou par les bibliothèques des grandes écoles et de la Sorbonne. Le *Journal de physique* proposait de plus systématiquement des résumés des articles des principales revues étrangères. Il semble pourtant que l'accessibilité des documents ait posé quelques difficultés même à une personne aussi importante que Louis de Broglie jusqu'au début des années 1930. Deux anecdotes qui

---

<sup>457</sup> Winter (1933-B), ce qui est en gras est souligné par moi.

<sup>458</sup> La correspondance de Proca (qui semblait avoir plus de liens personnels, si ce n'est intellectuels, avec les personnes que j'ai placées dans le groupe des théoriciens) tend à montrer qu'il y avait tout de même des interactions d'ordre scientifique entre ces physiciens. Cependant, il s'agissait davantage de soumettre à la critique les travaux des uns et des autres que de réellement collaborer étroitement sur des thèmes de recherche communs. De fait, on trouve très peu de travaux possédant une double signature.

<sup>459</sup> Jean Langevin (1963).

concernent toutes les deux des articles d'Einstein en 1929, permettent de l'illustrer. La première concerne le fait que Louis de Broglie a écrit à Einstein le 29 janvier 1929 pour lui demander de lui transmettre un article paru dans les *Berichte* de l'Académie de Berlin qu'il a beaucoup de peine à avoir à Paris<sup>460</sup>. La seconde est citée par Lochak<sup>461</sup> qui la tient lui-même de Jean-Louis Destouches. Louis de Broglie souhaite consulter à la bibliothèque de la Sorbonne un article d'Einstein en compagnie de Destouches. Les deux hommes se voient refuser l'accès à la bibliothèque sous-prétexte qu'ils ne sont pas inscrits (Louis de Broglie est pourtant alors maître de conférences à la Sorbonne !). Jean-Louis Destouches pousse alors de Broglie à s'imposer en mettant en avant le fait qu'il est maître de conférences et qu'il est titulaire de la légion d'honneur<sup>462</sup>.

La bibliothèque de l'Institut Henri Poincaré ouvre cependant ses portes à partir du début des années 1930. Les registres ont été conservés<sup>463</sup> et on peut ainsi se faire une idée des documents que consultaient les théoriciens français. Sans surprise, Brillouin, Proca ou Goldstein consultent essentiellement des documents allemands, notamment la revue *Zeitschrift für Physik* qui est en pointe des revues consacrées à la physique théorique moderne. Mais de Broglie, Destouches, Winter et Kwal ne semblent pas avoir non plus de problèmes insurmontables avec l'allemand si on en croit les documents qu'ils consultent. Seul Petiau, semble-t-il, ne consulte que des documents français et anglais, si bien que ce facteur n'a sans doute pas été quelque chose de déterminant. Ceci semble confirmé par le témoignage de Jean Langevin, qui indique que les exigences linguistiques dans l'enseignement supérieur français étaient assez élevées et qu'il était donc rare que les physiciens ne connaissent pas suffisamment d'allemand pour être en mesure de suivre des textes de physique.

Quoi qu'il en soit, nous avons donc, pour schématiser, d'un côté des physiciens souvent proches de Louis de Broglie qui travaillent relativement collectivement, ou du moins qui sont en discussion entre eux, mais qui travaillent essentiellement en circuit fermé (c'est par exemple très largement le cas pour Petiau et Destouches) sur des sujets très généraux, et de l'autre une poignée de physiciens qui sont beaucoup plus isolés dans le contexte théorique français, mais qui sont cependant plus ouverts sur l'étranger et travaillent sur des sujets souvent plus concrets<sup>464</sup>. On peut ajouter que l'inclusion d'autres physiciens moins productifs durant cette période n'aurait fait que renforcer cette conclusion. Nous aurions en effet été amené à considérer les travaux de René Dugas, Paulette Février ou Marie-Antoinette Tonnelat<sup>465</sup>, tous trois élèves de Louis de Broglie et dont les travaux partagent avec ceux des autres membres du groupe la caractéristique d'être éloignée des préoccupations expérimentales.

Ces conclusions ont largement été obtenues par Pestre<sup>466</sup>. Ce dernier indique en substance que l'on peut voir, à travers les travaux de ce groupe, ressurgir la vieille tradition de la physique mathématique à la française.

Il me semble cependant que la mobilisation d'autres catégories, celles que nous avons présentées précédemment, permet d'être plus fin dans l'analyse. Par exemple, il ne semble pas que

---

<sup>460</sup> De Broglie (1929-A).

<sup>461</sup> Lochak (1992), p. 195.

<sup>462</sup> Cette anecdote illustre également sans doute assez bien les personnalités des deux hommes.

<sup>463</sup> Archives de l'Institut Henri Poincaré, Registre de la bibliothèque.

<sup>464</sup> Proca rentre sur le plan relationnel dans ce schéma (il n'est pas proche de Louis de Broglie et ouvert sur l'étranger), mais moins sur le plan intellectuel (sa démarche est très abstraite).

<sup>465</sup> Il peut paraître étonnant de ne pas retrouver Tonnelat parmi les portraits des principaux théoriciens de l'époque. La raison en est qu'elle ne passe sa thèse qu'en 1941, et qu'elle n'apparaît donc pas encore vraiment dans le milieu des physiciens théoriciens des années 1930, auquel j'ai réservé cette étude.

<sup>466</sup> Pestre (1984), pp. 104-134.



l'on peut réellement étiqueter sous la même appellation les travaux de Jean-Louis Destouches et ceux de Gérard Petiau, qui n'ont en réalité en commun que leur abstraction. Pour reprendre le terme de Bitbol, le premier pratique une physique méta-théorique, à la recherche des principes qui régulent les théories physiques. Son approche, qui comprend une phase inductive (recherche des premiers principes) puis déductive (recherche des propriétés des théories qui en découlent) utilise une présentation très mathématisée. Mais la mathématique est ici utilisée comme un outil, et non pas comme une visée. L'objectif de Destouches n'est en aucun cas de parfaire un formalisme mathématique ou de perfectionner des méthodes mathématiques qui serviraient à la résolution d'une classe de problèmes. Il est philosophique et épistémologique. En somme Destouches se rapprocherait davantage de ce que l'on a nommé les théoriciens à principes, à ceci près qu'il s'agirait ici plutôt d'un méta-théoricien à principes. Ceci est également vrai pour Paulette Février. Gérard Petiau et Bernard Kwal se rapprochent quant à eux davantage de ce que l'on a nommé les théoriciens formalistes. Nous pouvons par exemple contraster leur approche de la physique théorique avec celle d'un réel mathématicien, John Von Neumann. Le travail de ce dernier en mécanique quantique n'a pas consisté à produire une physique nouvelle, mais à encoder une théorie physique déjà essentiellement construite sous une forme mathématique rigoureuse. Au contraire, une partie au moins du travail de Petiau et Kwal comprend une volonté de dépasser le stade contemporain de la physique en proposant des formalismes (par exemple l'algèbre des matrices  $\Gamma$  pour Petiau et les quaternions pour Kwal) qui, par leur pouvoir heuristique, offriraient la possibilité d'établir de nouveaux résultats physiques. Enfin, les travaux de Petiau et Kwal, contrairement à ceux de Von Neumann, ne prétendent pas faire œuvre originale pour le domaine des mathématiques.

Pour résumer, il me semble que sous le même vocable (physique mathématique), Pestre rassemble des approches très différentes de la théorie. En revanche, il semble pertinent de penser que ce que tous ces physiciens ont en commun, c'est le peu d'intérêt pour les résultats expérimentaux nouveaux. Leur immersion au sein de l'Institut Henri Poincaré (dominé par les mathématiciens) et leur absence de contact avec les expérimentateurs ne leur permettent pas d'acquérir une culture de « théoricien de laboratoire ». En somme, chez tous ces physiciens, l'élaboration théorique suit sa propre logique et ne fait pas ses courses au marché des nouveaux résultats expérimentaux.

La question qui se pose est alors la suivante : pourquoi le sentiment existe-t-il, chez un grand nombre de physiciens ayant commencé leur carrière dans les années 1940, que la physique théorique française était dominée par cette tendance alors même qu'il existait une autre physique théorique davantage tournée vers la résolution des problèmes (Brillouin, Goldstein, Solomon, Elsasser). La réponse n'est pas difficile à trouver : les trois derniers n'ont jamais pesé institutionnellement et, pour différentes raisons, ont disparu de la physique théorique française pendant la seconde guerre. Le premier n'a semble-t-il jamais tenté non plus de rassembler une école de physique théorique centrée sur ses sujets de prédilection. La place naturelle pour un jeune physicien souhaitant s'initier à la théorie était l'Institut Henri Poincaré, zone d'influence de Louis de Broglie et de son groupe. Francis Perrin, également membre de l'Institut Henri Poincaré, et qui aurait pu également être le *leader* d'une autre physique théorique en France, n'a semble-t-il jamais souhaité occuper ce rôle si l'on en croit les mémoires d'Anatole Abragam<sup>467</sup>.

Le second point que je voudrais mettre en évidence est l'absence de prise en considération de la théorie quantique des champs en France durant cette période. La théorie quantique des champs était

---

<sup>467</sup> Abragam (1989).

largement utilisée, il est vrai à des degrés divers, partout ailleurs à l'étranger. Certes, de nombreux physiciens n'acceptaient pas ce que l'on pourrait appeler le « programme fort » de la théorie quantique des champs initiée par Jordan, c'est-à-dire une description unifiée de toutes les particules à travers le concept de champ quantique. Mais même lorsqu'ils refusaient d'appliquer ce programme pour l'électron, ils admettaient souvent cependant sa pertinence pour la description du photon et celle des interactions nucléaires (théorie de la désintégration  $\beta$  de Fermi ou théorie du méson de Yukawa). Or, en dehors de Jacques Solomon, cette approche de quantification de champs, clef de voûte de très nombreux succès de la physique théorique d'après-guerre (y compris dans le domaine de la matière condensée), a été ou bien complètement négligée (c'est le cas d'Alexandre Proca ou de Bernard Kwal, au moins jusqu'au début de la seconde guerre mondiale) ou bien alors explicitement concurrencée par des programmes d'unification alternatifs (c'est le cas du groupe de Louis de Broglie à travers le programme de recherche de la mécanique ondulatoire des particules relativistes à spin). Il est à cet égard notable de constater que la plus importante contribution française à la théorie quantique des champs d'avant-guerre (équations de Proca) n'a pas été conçue explicitement à l'intérieur du cadre conceptuel de cette théorie. Les physiciens qui sont tournés vers des sujets de recherche moins fondamentaux et pour lesquels une approche par la mécanique ondulatoire était amplement suffisante, comme c'est le cas de Goldstein ou Brillouin, auront, bien entendu, moins d'intérêt à prendre en considération cette théorie. C'est pourtant dans « l'ancien » domaine de la physique atomique qu'une des percées décisives mènera la théorie quantique du champ électromagnétique vers un de ces plus grands succès à la fin des années 1940 (décalage de Lamb). Le fait que la théorie quantique des champs menait à des déplacements (qui étaient alors calculés comme étant infinis) des niveaux d'énergies des atomes a été anticipé par Oppenheimer au début des années 1930. Il est assez intéressant de noter la réaction de Goldstein à cet égard :

« Le traitement simultané de la statique (structure des niveaux) et de la dynamique atomique (transitions) a été l'objet des récentes recherches de Heisenberg et Pauli<sup>468</sup> et d'Oppenheimer<sup>469</sup>. Leur but était de montrer jusqu'à quel point on peut aller dans la fusion des champs d'onde, le champ d'onde de de Broglie et le champ électromagnétique, à l'aide des moyens dont on dispose actuellement dans la théorie des quanta. [...]

La théorie unitaire des champs<sup>470</sup> [...] contient des difficultés qui conduisent à des résultats inadmissibles. Ceci non seulement pour le cas de plusieurs électrons mais déjà, dans le problème à un corps et la théorie appliquée à l'hydrogène conduit à des niveaux contraires à l'expérience.

Certes, le traitement unitaire des champs d'onde reste l'idéal à approcher. [...]

<sup>468</sup> Goldstein fait référence ici aux articles W. Heisenberg, W. Pauli. (1929). *Z. Physik.*, 56 p. 1 et 59 p. 168 dans lesquels les deux auteurs développent le formalisme Lagrangien de la théorie quantique des champs, et introduisent la jauge de Coulomb.

<sup>469</sup> Goldstein fait référence à un article d'Oppenheimer (1930) dont nous avons déjà parlé (voir section Solomon), dans lequel il reprend le formalisme développé par Heisenberg et Pauli, et tente de calculer le déplacement au second ordre des niveaux d'énergies qui résulte de l'interaction entre l'électron et le champ électromagnétique. Il y découvre notamment qu'en plus de l'énergie électrostatique infinie habituelle, il y a également une contribution infinie provenant de l'émission et de la réabsorption virtuelles de photons transverses.

<sup>470</sup> À ne pas confondre avec les théories unitaires des champs développées, notamment autour d'Einstein, à l'intérieur du cadre conceptuel de la relativité générale. Ici, Goldstein fait référence aux travaux de Heisenberg, Pauli et Oppenheimer, qui concernent la théorie quantique des champs. L'expression « fusion des champs » semble mal choisie. Il y a seulement unification en ce sens que le champ électromagnétique et le champ d'onde de Louis de Broglie y sont présentés à un même niveau de description : ce sont tous les deux des champs quantiques.

[Mais] il semble que le résultat fondamental des recherches d'Heisenberg et Pauli, complétés par Oppenheimer, consiste à affirmer que la théorie classique assujettie aux conditions quantiques ne peut donner des éclaircissements nouveaux sur la dynamique atomique<sup>471</sup> ».

Il n'est bien sûr pas question de céder à l'illusion rétrospective suscitée par la position confortable dans laquelle nous sommes en sachant à quel point les travaux en question de ces trois auteurs se révéleront fructueux par la suite. Il est certain que la théorie quantique des champs n'avait pas, en 1930, acquis une maturité suffisante pour atténuer le scepticisme justifié des théoriciens les plus lucides à son égard. Mais même si l'on admet qu'elle n'était alors qu'une voie parmi d'autres possibles, on ne peut que constater qu'elle n'a pas été empruntée, que ce soit délibérément ou par omission, par les théoriciens français, ce qui les a privés de la participation à un des développements théoriques quantiques les plus fertiles du XX<sup>e</sup> siècle.

## **II- Réception philosophique et épistémologique de la mécanique quantique**

La mécanique quantique est une théorie dont les implications épistémologiques et philosophiques sont très profondes, sans doute encore plus que celles introduites par la relativité<sup>472</sup>. D'après les souvenirs de Heisenberg<sup>473</sup>, Bohr indiquait ainsi que « si, de prime abord, on n'est pas horrifié par la théorie quantique, on ne l'a certainement pas comprise ». On s'attend dans ces conditions à ce qu'un des principaux critères de la réception de la mécanique quantique soit l'acceptation ou non des conséquences philosophiques qu'elle entraîne. On doit en particulier s'attendre à un rejet d'autant plus fort que ces conséquences sont importantes. Dominique Pestre a par exemple implicitement admis qu'une des raisons de la lente diffusion de la mécanique quantique en France était son refus de l'interprétation de Copenhague chez les physiciens français :

« [...] dans ce pays fier de sa Raison et de ses savants, rien n'incite au bouleversement, au renversement des idoles ; d'autre part, que rien ne peut plus faire horreur à la Raison cartésienne que le pythagorisme d'un Heisenberg ou l'éviction joyeuse par Bohr de l'un des postulats clé et évident de la pratique scientifique : la recherche d'un déterminisme. Certes, les Français ont pu jouer un rôle essentiel dans la physique mathématique du XIX<sup>e</sup> siècle, mais ils sont moins à l'aise dans le monde de l'atome, dans un monde de pseudo-objets ne se déplaçant plus dans le cadre du temps et de l'espace communs. Et cela est vrai même pour ceux qui acceptèrent le plus vite ces théories étrangères, comme nous l'avons signalé à propos de ces deux grandes figures que furent Paul Langevin et Louis de Broglie<sup>474</sup> ».

---

<sup>471</sup>Goldstein (1930).

<sup>472</sup> Voir introduction.

<sup>473</sup> Heisenberg (1993).

<sup>474</sup> Pestre (1985), p. 1005. Pestre répond dans cet article explicitement à la question « pourquoi une difficile réception de la mécanique quantique en France ? ». Il faut tout de même indiquer que les conclusions qu'il tire dans son ouvrage *Physique et physiciens en France* (Pestre (1984)), ou du moins la manière dont il les exprime, sont plus nuancées sur cette question, en admettant notamment que le refus de l'indéterminisme de principe ne signifiait pas forcément un rejet, ni même une absence d'utilisation de la théorie.

D'un autre côté, il faut bien admettre que la mécanique quantique n'a jamais suscité les mêmes réactions épidermiques que ne l'avait fait la théorie de la relativité. Helge Kragh indique par exemple :

« Compared to the theory of relativity, quantum mechanics developed rapidly, disseminated very quickly, and *met almost no resistance*. [...] Although quantum mechanics was no less counterintuitive than relativity, there was no quantum counterpart to the antirelativistic literature that flourished in the 1920s.<sup>475</sup> ».

Dans le même ouvrage, Helge Kragh suggère peut-être un début de réponse à ce « paradoxe » apparent :

« Many European physicists were deeply occupied with the philosophical implications of the new mechanics and devoted much time to discussing the broader meaning of the theory's strange nonclassical features. Do physical properties come into existence only as a result of measurements? If so, is the observed world real an objective? Can the object and subject be distinguished or do they form an indissoluble whole? Can the lessons of quantum mechanics be extrapolated to society and culture? For Bohr, Einstein, Heisenberg, Jordan and others, it was important to understand these features as it was to calculate physical problems with the new technique. The American's attitude was markedly different. Although there was considerable interest among Americans in foundational issues, for example in the correct formulation of the uncertainty principle, they did not care much about the larger philosophical problems associated with quantum mechanics. [...] According to this attitude, experimental results were all that mattered and could be meaningfully discussed; the job of the quantum physicist was therefore to make calculations that could be checked experimentally<sup>476</sup> ».

En quoi cette citation de Kragh peut-elle nous éclairer ? Tout d'abord, la dernière phrase nous rappelle une évidence : contrairement à ce qui s'est produit pour la théorie de la relativité, la mécanique quantique possédait très tôt un complexe de résultats expérimentaux avec lesquels elle pouvait être confrontée, et cela sans avoir de concurrente crédible (comme c'était le cas pour la théorie de la relativité qui devait rivaliser avec certaines théories électrodynamiques non-relativistes). Ce succès de la théorie à, par exemple, rendre compte correctement et avec une précision très grande des spectres atomiques était une donnée qui s'imposait à toute personne qui adoptait une attitude sérieuse et ouverte. Cette remarque relativement banale étant faite, la citation nous suggère que face à une telle situation, une multitude d'attitudes s'offre aux physiciens. Tout d'abord, l'attitude « américaine », qui est sans doute la moins problématique, d'autant qu'elle peut être adoptée en fonction du moment par des physiciens qui, par ailleurs, pendant leurs temps de « loisirs », s'intéressent effectivement aux aspects épistémologiques de la théorie. Dans ce cas, les considérations philosophiques ne rentrent que très peu en compte dans les choix des physiciens. Une seconde attitude consiste à s'intéresser de près à ces questions au point que celles-ci aient des incidences effectives sur la relation qu'entretient le physicien avec la théorie. Mais nous pouvons encore nous servir de la comparaison avec la théorie de la relativité pour souligner le fait suivant : le langage adopté dans la théorie de la relativité est un langage « réaliste » portant sur des entités physiques identifiables et compréhensibles par tous (le temps, l'espace...). Une phrase telle que : « le temps vécu et mesuré par l'observateur  $\alpha$  entre ces deux événements n'est pas le même que celui vécu et mesuré par un observateur  $\beta$  en translation uniforme

---

<sup>475</sup> Kragh (1999), p. 169. C'est moi qui souligne.

<sup>476</sup> Kragh (1999), p. 172

avec lui », est une phrase, qui ne pose pas de problèmes principaux de compréhension<sup>477</sup>. En revanche, dès que l'on tente de sortir de la technicité inhérente au formalisme quantique, en construisant des phrases portant sur des phénomènes physiques microscopiques, une multitude de termes, dont la signification et le statut physique ne sont pas très clairs, sont employés. Il est par exemple loin d'être évident de comprendre ce que signifie réellement une phrase telle que : « il existe un flou complémentaire dans la détermination de la position et de la vitesse d'une particule<sup>478</sup> ». Il est encore plus difficile de comprendre des phrases telles que : « la création de paires d'électrons et de positrons virtuels entraîne une polarisation du vide quantique »<sup>479</sup>. Or, précisément, ce flou conceptuel va permettre à chacun d'avoir une lecture très personnelle des implications philosophiques de la théorie. En quelque sorte, ce flou autour de la signification ontologique de la théorie va permettre d'éviter une confrontation trop directe et trop rude entre elle et l'ensemble des présupposés du physicien.

Il y a ainsi toujours l'espace pour l'aménagement d'une stratégie de sauvegarde de ses présupposés. Cette stratégie peut être celle de la temporisation (sur le mode : « j'accepte les résultats et les prédictions de la théorie en attendant que la situation présente soit dépassée, autrement dit je suspends provisoirement mon jugement »), celle de l'instrumentalisation (« les traits saillants de la théorie sont compatibles avec mes présupposés et je peux même me servir de son succès pour renforcer mes options philosophiques particulières ») et de la consolidation (« je suis pleinement satisfait de la théorie et essaie de la consolider philosophiquement »), ou encore celle d'une conversion résignée (« j'admets que le succès de la théorie m'amène à revoir un certain nombre de mes anciennes options philosophiques »).

Nous avons pour résumé d'un côté une attitude qui est, par définition, peu problématique (la stratégie « américaine ») puisqu'elle consiste tout simplement à ne pas se préoccuper du problème, et de l'autre, une pléthore de stratégies différentes pour ceux qui décident de s'en préoccuper.

C'est donc seulement dans des rares cas que des considérations purement philosophiques font réellement obstacles à la pratique de la mécanique quantique telle quelle. Dans ces derniers cas, deux réactions sont alors possibles : la « politique de l'autruche », qu'Einstein a rendu célèbre<sup>480</sup>, et la politique de recherche d'une alternative.

<sup>477</sup> Bien entendu, des discussions philosophiques subtiles portant par exemple sur le lien entre temps physique (objectivement mesurable par une horloge) et temps psychologique, etc., peuvent avoir lieu. Mais cette phrase ne pose pas de très grands problèmes de compréhension dans une approche par exemple « physicaliste » (dans le sens où l'on reconnaît une relation entre l'état physique du cerveau du second observateur - subissant lui-même le ralentissement de Lorentz par rapport au premier - et sa perception du temps).

<sup>478</sup> Le formalisme de la mécanique quantique est extrêmement clair sur ce point, mais il est aussi extrêmement avare en explications. Il indique seulement qu'étant donné un système que l'on peut décrire à l'aide d'une fonction d'onde (ou d'un vecteur d'état), l'espérance (au sens probabiliste) de l'écart entre le résultat obtenu et le résultat espéré si l'on entreprend une mesure sur la position de la particule est inversement proportionnelle à l'espérance de l'écart entre le résultat obtenu et le résultat espéré si l'on entreprend de faire une mesure sur la quantité de mouvement. Autrement dit, le formalisme indique une « indétermination » sur **les prédictions des résultats** de mesure, mais ne dit absolument rien de plus, hormis les contraintes qu'il impose (et qui seront découvertes pendant la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, comme le théorème de Bell) à toute tentative de descriptions plus spéculatives des phénomènes.

<sup>479</sup> Le formalisme indique seulement que la valeur moyenne de la charge associée à un certain état du champ quantique de l'électron est modifiée à partir du second ordre de la théorie des perturbations par des termes faisant intervenir des produits entre éléments de matrices de l'Hamiltonien d'interaction, éléments qui couplent le vecteur représentant cet état avec des vecteurs qui correspondent à des états pour lesquels une paire supplémentaire d'électron-antiélectron est présente.

<sup>480</sup> Einstein écrivait à Louis de Broglie les lignes suivantes en 1954 : « ma méthodologie [...], vue de l'extérieur, semble assez bizarre. En effet, je dois ressembler à l'oiseau du désert, l'autruche, qui sans cesse cache sa tête dans le sable relativiste pour ne pas faire face aux méchants quanta » (Einstein (1954)). En réalité, il s'agissait



C'est bien de cette manière que se classent les différentes réactions que l'on peut documenter en France, et c'est ce que nous allons tenter de montrer dans la suite de cette section<sup>481</sup>.

Mais avant cela, un commentaire méthodologique : cette étude ne se restreint pas aux toutes premières années de l'apparition de la mécanique quantique. Les premières réactions françaises que nous connaissons sur les problèmes philosophiques liés à la mécanique quantique sont ceux de Louis de Broglie et de Paul Langevin à la fin des années 1920. Du fait du nombre restreint de physiciens en France ayant le désir et les compétences de suivre les premiers développements quantiques, la question du déterminisme par exemple n'est sans doute pas apparue – mis à part confidentiellement ou dans les travaux de Louis de Broglie sur la double solution et l'onde-pilote – avant 1927 et la tenue du Conseil Solvay. C'est sans doute seulement après cette année, notamment par la publication (en français) des actes du colloque (avec notamment les discussions et la contribution de Niels Bohr sur la complémentarité) puis ensuite par la tenue de réunions entre physiciens et philosophes (par exemple dans le cadre de la Société Française de Philosophie) et la parution de nouvelles publications (la *Revue de synthèse* et les *Actualités scientifiques et industrielles*), que les grandes questions philosophiques qui concernent la mécanique quantique vont pouvoir rentrer dans le champ de réflexion d'un nombre plus important d'individus. Parmi eux, certains ont mis beaucoup de temps à faire connaître (du moins par l'écrit) leurs réflexions sur le sujet. Ainsi, je serai amené à m'appuyer sur des textes assez tardifs. En outre, une des périodes les plus passionnantes pour les questions philosophiques de la mécanique quantique est justement la période qui suit le retour de Louis de Broglie à une interprétation causale (les années 1950). C'est donc une vaste période (environ jusqu'aux années 1960) qui est considérée ici.

## 1- L'indifférence

Elle peut relever de plusieurs formes, et le terme « indifférence » n'est d'ailleurs pas, à proprement parler, à prendre littéralement dans un certain nombre de cas. À l'instar de beaucoup d'américains, il semble cependant exister une réelle indifférence sur ces questions chez certains physiciens français qui adoptent une position qui peut se résumer par la phrase d'Yves Rocard rapportée par François Lurçat pour illustrer son inintérêt aux questions de fondements :

« Nous allons passer à la physique maintenant. Cela va être un peu faux<sup>482</sup>. »

Elle peut également se retrouver chez Louis Néel, pour qui « le physicien, celui qui s'appuie sur l'expérience, estime que son domaine et celui des philosophes sont bien distincts et n'ont aucun intérêt à se confondre, comme le confirment les dangereuses aventures que la mécanique quantique a inspirées aux philosophes<sup>483</sup> ». Frédéric Joliot en est un autre représentant. Celui-ci ne s'est pas

---

plutôt d'une politique de contournement du problème : c'est en l'attaquant à partir d'un tout nouvel angle, celui de la relativité, qu'Einstein espérait donner de nouveaux fondements conceptuels à la théorie quantique.

<sup>481</sup> Il n'est pas question de dire que chaque physicien que nous allons étudier rentre parfaitement dans les différents « moules ». L'objet de ce chapitre n'est pas de classer les physiciens dans des cases, mais de nous servir de certaines de leurs réflexions les plus caractéristiques afin d'illustrer les différentes attitudes qui ont été effectivement adoptées en France pendant cette période.

<sup>482</sup> Lurçat (2011).

<sup>483</sup> Néel (1991), p. 7



intéressé, selon ses biographes<sup>484</sup>, aux débats, surtout présents après la seconde guerre mondiale et parmi les marxistes, sur un éventuel conflit entre le matérialisme dialectique et la complémentarité. Lurçat indique également, qu'un jour où il déclarait à Joliot que Bohr était un idéaliste, Joliot lui aurait répondu : « Bohr est idéaliste quand il faut l'être<sup>485</sup> ».

Mais on peut généraliser cette attitude à une autre classe de physiciens, moins portés sur l'expérience et s'intéressant davantage aux côtés formels de la théorie. Nous ne connaissons pas les positions philosophiques des élèves de Louis de Broglie comme Bernard Kwal et Gérard Petiau<sup>486</sup> sur la mécanique quantique, mais il ne semble pas que ces questions aient joué un rôle important dans leur production scientifique. Leurs travaux, de nature toujours très formelle, consistaient essentiellement à produire des équations et à trouver les solutions les plus générales. Dans ces conditions, la signification physique même des symboles passe souvent au second plan<sup>487</sup> ; on peut alors penser que c'est d'autant plus le cas pour les implications philosophiques de la théorie. Dirac indiquait qu'il n'avait jamais aimé la complémentarité de Bohr, car celle-ci ne permettait pas d'obtenir de nouvelles équations. Je crois que cette attitude d'indifférence vis-à-vis de ce genre de questions reflète assez bien l'attitude d'une série de physiciens que l'on pourrait qualifier de formaliste<sup>488</sup>, comme il pouvait en exister autour de Louis de Broglie.

Un physicien formaliste sur lequel nous pouvons, grâce à une meilleure documentation disponible, tenter de tester cette conjecture est Alexandre Proca. Nous avons vu que ses articles étaient assez minimalistes vis-à-vis de l'interprétation physique des symboles. Il ne s'est donc en conséquence que très peu exprimé, dans ses travaux techniques, sur les aspects épistémologiques et philosophiques de la physique qu'il pratiquait. Dans un de ses articles cependant, après avoir développé un nouveau formalisme pour l'énergétique<sup>489</sup>, Proca pose la question :

« Ces vues d'ensemble ont comme point de départ la conception classique de la description des phénomènes, qui est celle de la mécanique analytique. Elles sont donc en contradiction avec les idées modernes et, en particulier, avec le principe d'indétermination d'Heisenberg. Une discussion beaucoup plus approfondie est nécessaire pour en dégager l'essentiel ou pour les mettre d'accord<sup>490</sup> ».

Mais cette place réservée à ce sujet, à savoir celui du déterminisme, est très marginale dans l'argumentation de Proca, qui est avant tout d'ordre formel. La vraie question qui est posée dans cet article est de savoir si l'analogie formelle entre l'entropie et la fonction d'onde permet ou non de poser des fondements plus solides pour la mécanique ondulatoire que ceux à partir desquels cette théorie a effectivement été construite. La question du probabilisme de la mécanique quantique nourrira en réalité les réflexions de Proca sur un aspect plus technique que philosophique : la notion de probabilité imaginaire, qu'il introduit dès l'écriture de cet article, et qu'il rediscute plus de dix ans plus tard au

---

<sup>484</sup> Pinault (2000).

<sup>485</sup> Lurçat (2011).

<sup>486</sup> Pierre Petiau, son fils, m'a indiqué qu'il ignorait lui-même si son père était intéressé par ce genre de questions, le plus probable étant qu'il ne s'y intéressait pas beaucoup. Nous ne connaissons pas sa réaction lorsque Louis de Broglie a changé d'orientation. Si Petiau a un peu participé à la théorie de la double solution, on peut penser qu'il s'agissait surtout pour lui d'un défi mathématique.

<sup>487</sup> On se souvient du travail de Kwal sur la physique quantique relativiste, dans lequel il était difficile d'interpréter physiquement ce que signifiaient certaines de ses généralisations formelles.

<sup>488</sup> Je ne veux ici bien sûr pas dire qu'il s'agit d'une généralité. Je veux seulement indiquer que c'est effectivement une attitude qu'on peut s'attendre à retrouver souvent chez ce type de théoriciens.

<sup>489</sup> Voir plus haut.

<sup>490</sup> Proca (1929), p. 14.

séminaire Fréchet. Pour illustrer cette notion, Proca prend l'exemple du jeu de pile ou face, dans lequel la probabilité d'obtenir simultanément pile puis face, si la probabilité de trouver pile est égale à  $p$  (la pièce pouvant être truquée) est :  $P = p(1 - p)$ . Renversant les termes du problème, Proca remarque alors que, si nous avons uniquement la connaissance empirique de  $P$ , la valeur de  $p$  peut être trouvée par la résolution en  $p$  de cette équation du second degré, qui admet deux racines dont l'une est imaginaire. Proca conclut qu'en ne prenant en compte que la solution réelle, on fait une restriction qui ne se justifie pas sur le plan mathématique<sup>491</sup>.

On voit donc que même lorsque la question de l'interprétation probabiliste est prise en considération, le penchant naturel de Proca le fait tendre à la regarder d'un point de vue mathématique.

En réalité, Proca n'a pas complètement ignoré les problèmes liés à l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique, comme en témoigne un manuscrit écrit à la fin des années 1940, présent dans ses archives et qui fait le tour de la question. Mais la manière dont il l'a traité tend à indiquer 1) qu'il n'a pas cherché à produire une réflexion originale sur celle-ci, 2) que ces problèmes ne semblent pas l'avoir tourmenté outre mesure.

Pour montrer le point 1), il faut remarquer que Proca reprend à son compte une interprétation extrêmement courante de l'indéterminisme quantique, interprétation très répandue dans les années 1930-1940, mais qui ne s'est jamais vraiment estompée<sup>492</sup>. Il s'agit de la perturbation incontrôlable du système par l'appareil de mesure. Proca part de la remarque bien connue selon laquelle, lors d'une mesure, « il doit y avoir nécessairement interaction entre le système et cet appareil sans quoi ce dernier ne fournirait plus aucune indication. **Il est clair donc que le processus même de la mesure introduit une perturbation dans le phénomène considéré**<sup>493</sup> ». Il indique que cette perturbation peut être rendue aussi faible que possible en physique classique, en améliorant par exemple l'appareil de mesure. « Or, continue-t-il, c'est précisément sur ce point que la mécanique quantique nous a obligés à modifier notre façon de voir. En effet cette mécanique étudie le mouvement des particules ultimes de la matière, électrons, protons, etc. Or, en dernière analyse les appareils de mesure eux-mêmes sont constitués par des particules de ce genre ; nous mesurons donc certains éléments avec d'autres éléments du même ordre de grandeur : il n'est pas étonnant que les perturbations ne soient pas toujours nécessairement petites [...] ; a priori, on peut imaginer qu'il soit possible d'agencer les mesures de telle façon que toutes les perturbations introduites soient rendues négligeables et s'annulent lorsqu'on passe à la limite. Cela suppose toutefois une condition essentielle pour tout passage à la limite, à savoir la **continuité**<sup>494</sup>. Or, si cette continuité existe en physique classique elle fait défaut en mécanique quantique. Une certaine grandeur mécanique, l'action, varie par bond : sa valeur est toujours un multiple entier de la constante  $h$  de Planck. Le passage à la limite est impossible et il s'ensuit que toute mesure introduit essentiellement une perturbation, d'ailleurs imprévisible, dans le phénomène étudié<sup>495</sup>. »

Pour illustrer cette argumentation classique, Proca utilise un exemple, également classique : la diffraction d'un faisceau électronique par une fente de diamètre  $\alpha$ . Au moment du passage des électrons au niveau de l'écran percé, les électrons qui traversent la fente possèdent une position définie

<sup>491</sup> Archives de l'Académie des Sciences (Fond Proca/ Boîte 42bis), Proca (1942).

<sup>492</sup> C'est encore cette interprétation qui semble dominer beaucoup de manuels et de livres de vulgarisations sur la physique quantique aujourd'hui.

<sup>493</sup> C'est Proca qui souligne.

<sup>494</sup> *Idem*.

<sup>495</sup> Archives de l'Académie des Sciences (Fond Proca / Boîte 42bis), Proca (1942). Archives Proca, Collège philosophique, sans titre. 1947.

à  $\alpha$  près selon l'axe parallèle à l'écran. Mais cette mesure de la position « a perturbé le phénomène « mouvement de l'électron » et la mécanique ondulatoire nous enseigne de quelle façon. La vitesse de l'électron [...] a été affectée de telle façon que nous ne saurions désormais mesurer sa composante à plus de  $h/\alpha$  près, quelle que soit la méthode employée. » De là, donc, découle « les relations d'indétermination de Heisenberg » : « nous ne pouvons pas connaître simultanément deux grandeurs conjuguées, si nous donnons au terme « connaître » le seul sens raisonnable, à savoir « percevoir réellement » ou encore « mesurer ».

Au fond, et cela démontrera le point 2), Proca nous enjoint de penser qu'il n'y a rien de bien mystérieux dans la description quantique des phénomènes et que, « en réalité, il n'y a rien de choquant à admettre cette dualité à laquelle notre expérience quotidienne nous prépare de mille façons : nous ne pouvons pas, par exemple, apercevoir un visage à la fois de face et de profil ; ou encore, lorsqu'on observe une préparation au microscope et qu'on met au point sur un plan déterminé, tous les autres plans sont nécessairement flous et inobservables ».

Avant de conclure, je voudrais revenir sur l'interprétation donnée à la mesure quantique par Proca tant elle est importante d'un point de vue sociologique. La postérité de cette interprétation est étroitement liée à l'impact de l'expérience de pensée du microscope à rayon  $\gamma$  de Heisenberg. Dans cette expérience où l'on cherche à mesurer la position d'un électron, les lois de l'optique indiquent que la précision sur la mesure de la position par diffusion de l'onde sera d'autant plus grande que la fréquence de celle-ci est élevée. Dans le même temps, l'utilisation d'un rayonnement de très haute fréquence implique, d'après la relation  $E=h\nu$ , un échange énergétique entre l'électron et le photon associé à l'onde lumineuse d'autant plus grand que la fréquence est élevée. Il y aura donc perturbation de l'électron, perturbation incontrôlable et qui empêche de connaître la quantité de mouvement de cette particule. En cherchant à minimiser cette perturbation (c'est-à-dire en diminuant la fréquence), nous n'avons pas d'autre choix que de perdre en précision sur la connaissance de la position de l'électron.

Or, cette interprétation possède de nombreuses ambiguïtés, ce qui est d'ailleurs sans doute la raison essentielle de son succès et de sa longévité. Le terme « perturbation » peut par exemple se laisser interpréter d'une façon mécaniste (le photon a choqué l'électron, mais nous ne savons pas quelle quantité de mouvement il lui a transférée, d'où l'incertitude sur sa quantité de mouvement — c'est un peu ce qui transparaît des écrits de Proca), comme il peut se laisser interpréter de façon beaucoup plus subtile sur le plan épistémologique (ce qui est « perturbé » n'est pas l'électron en tant qu'objet physique à l'étude, mais l'ensemble du complexe physico-expérimental qui fixe les conditions de prédiction que l'on peut émettre quant au résultat de la mesure — c'est cette version de l'interprétation que favorisera Bohr, notamment après son débat avec EPR à partir duquel il deviendra évident que l'interprétation mécaniste est assez problématique). L'argument de la perturbation ménage donc une latitude assez grande à la personne qui l'adopte, qui pourra ainsi se servir de l'une ou de l'autre interprétation en fonction de ses besoins. Ces deux interprétations ont en effet chacun un emploi.

La première, mécaniste, permet de rassurer sur la signification des étrangetés quantiques (c'est nettement visible chez Alexandre Proca). Comme l'a très bien montré Bitbol<sup>496</sup>, cette lecture fait appel à une image métaphysique explicative (Bitbol emploie le terme de « méta-image »), celle de l'objet, de la chose en soi kantienne, affectant l'appareil de mesure et subissant une rétroaction. Elle est

---

<sup>496</sup> Bitbol (1996).

rassurante en ceci qu'elle maintient une représentation de la mesure tout à fait compatible avec les schémas classiques de pensée, et où la seule nouveauté est de ne plus négliger la réaction de l'appareil de mesure sur l'objet, inévitable corollaire de l'action du dernier sur le premier.

La seconde permet l'adoption d'une position anti-métaphysique lorsque l'on commence à questionner trop indûment cette « méta-image ». Si on reprend la phrase de Proca selon laquelle « [la mesure] a perturbé le phénomène « mouvement de l'électron » », nous sommes en droit de nous dire que le phénomène « mouvement de l'électron » continue d'exister, dans un état différent et inconnu de nous mais bien déterminé, après la mesure. Nous pouvons penser que, la valeur de la vitesse a été certes perturbée par l'appareil de mesure d'une manière que nous ne sommes plus en mesure de prédire, mais que, néanmoins, cette valeur existe toujours. D'une manière générale, une perturbation est un changement de propriétés d'un système, et non pas une disparition de ces propriétés. Cependant, poursuivent certains auteurs, la science n'a le droit de parler que de ce qui est expérimentalement accessible. Parler de la valeur de la vitesse d'un objet n'a alors pas de sens si celle-ci n'est pas observable. Comme le dit Bitbol à la suite de Popper, cette double attitude revient « à dérober d'une main la représentation méta-imagée qu'ils avaient laissé entrevoir de l'autre<sup>497</sup> ».

Or, toujours selon Bitbol, « la méta-image de l'action et la rétro-action qui lient l'objet à l'appareillage a été un moyen privilégié de conquête sociale. Si le séisme conceptuel provoqué par la naissance de la mécanique quantique a eu quelque retentissement dans le grand public, c'est en partie à travers elle. Face aux énigmes popularisées que sont la dualité onde-corpuscule et le paradoxe du chat de Schrödinger, elle a en effet eu le mérite d'offrir l'occasion d'une réappropriation rapide, par l'intuition représentative, de quelques-unes des raisons supposées de la situation aporétique<sup>498</sup> ».

Ce qu'indique Michel Bitbol me paraît tout à fait pertinent. Dans la mesure où cette explication par l'intermédiaire d'une « méta-image », accompagnée d'une extrême prudence épistémologique, a permis la réalisation d'une sorte de compromis entre une position que l'on pourrait qualifier de rationaliste ou de cartésienne et une position plus positiviste, elle a également rendu possible un relatif consensus (en réalité uniquement apparent) chez les physiciens du début des années 1930 sur l'interprétation de la mécanique quantique. C'est seulement après une clarification plus nette de la structure conceptuelle de la mécanique quantique – acquise à partir des années 1950 et 1960 – qu'un certain nombre de physiciens, conscients du fait qu'il fallait sortir de cet entre-deux, ont adopté des positions plus tranchées et plus conflictuelles entre elles. En attendant, l'idée selon laquelle la mécanique quantique ne posait pas de problèmes épistémologiques et philosophiques insolubles, et semblait même réduite à une situation presque banale (la seule nouveauté semblant par exemple selon Proca l'introduction de discontinuités) s'était largement répandue : il n'y avait pas lieu de se préoccuper de façon obsessionnelle de ces questions qui étaient en grande partie résolues.

En résumé, soit parce que ces physiciens ne considèrent pas avec beaucoup d'intérêt les questions philosophiques posées par les théories physiques, soit parce qu'ils estiment que celles posées en particulier par la mécanique quantique sont résolues, ces questions n'auront quasiment aucun impact sur leur manière d'utiliser (ou de ne pas utiliser) la théorie, qu'ils soient principalement tournés vers l'expérience ou vers le formalisme mathématique.

---

<sup>497</sup> Bitbol (1996), p. 243.

<sup>498</sup> Bitbol (1996), pp. 243-244.

## 2- La temporisation

Cette attitude est adoptée lorsque le physicien aperçoit effectivement des éléments déplaisants dans la théorie en question, sans qu'il souhaite remettre en cause les avancées fondamentales que celle-ci apporte à la physique. C'est essentiellement l'attitude que Paul Langevin adopta lors des premiers instants de la diffusion de la mécanique quantique<sup>499</sup> et qui peut se résumer par les propos suivants :

« Il convient d'attendre, pour se prononcer sur un si grave sujet, et de faire confiance [...] à la réflexion critique sur la signification exacte des mots et des idées. La recherche d'un déterminisme est à tel point le mobile essentiel de tout effort de construction scientifique, qu'on doit se demander, lorsque la nature laisse une question sans réponse, s'il n'y a pas lieu de considérer la question comme mal posée et d'abandonner la représentation qui l'a provoquée<sup>500</sup> ».

Il livre en public ses premières réactions en 1929, dans une conférence à l'ENS sur « l'orientation actuelle de la physique<sup>501</sup> », mais également au cours d'une réunion à la Société Française de Philosophie au cours de laquelle Louis de Broglie expose les implications philosophiques des nouvelles mécaniques<sup>502</sup>. Si Paul Langevin loue les travaux de Heisenberg, il est en revanche assez hostile à son interprétation du principe d'incertitude comme marquant la fin du déterminisme en physique. Pour Langevin, « le principe d'indétermination [n'] exprime [que] l'impossibilité de suivre expérimentalement ou plutôt de prévoir avec une précision illimitée l'évolution d'un système particulier ». La mécanique des matrices de Heisenberg constitue une étape provisoire, rendue nécessaire par les difficultés auxquelles se heurtait la théorie des quanta :

« Toutes les fois que le développement des constructions théoriques s'est trouvé en présence de difficultés comme celles dont il est question aujourd'hui, il s'est produit un retour vers l'attitude que les physiciens appellent phénoménologique et qui consiste à n'introduire, autant que cela peut avoir un sens, que des notions dérivées de l'expérience immédiate<sup>503</sup>. »

Mais cette situation ne saurait perdurer :

« Je crois, avec notre ami Meyerson, qu'une telle attitude ne peut pas avoir pour le physicien un caractère définitif et qu'elle représente seulement une position de repli devant les difficultés de l'attaque théorique. L'histoire de la physique montre que chaque repli de ce genre a été suivi par une offensive nouvelle et féconde dans le sens du besoin d'aller au delà de l'expérience immédiate, de comprendre la réalité en construisant une représentation à partir de notions plus ou moins abstraites<sup>504</sup>. »

---

<sup>499</sup> Pour une étude de l'interprétation de la mécanique quantique par Langevin, voir Freire (1993) et Maiocchi (1975).

<sup>500</sup> Langevin (1929).

<sup>501</sup> *Ibid.*

<sup>502</sup> De Broglie (1929). Discussion.

<sup>503</sup> *Ibid.* p. 381-382.

<sup>504</sup> *Ibid.* p. 382.

Paul Langevin modifiera quelque peu son attitude vis-à-vis de la théorie quantique lors des années suivantes, en tentant d'intégrer ses conséquences dans le cadre de pensée qu'il commençait alors à adopter, le matérialisme dialectique. Nous y reviendrons.

Théoricien proche de Paul Langevin pendant les années 1920 et le début des années 1930, Jean Ullmo peut être considéré comme un des représentants de cette attitude. Contrairement à son mentor, Jean Ullmo a intégré la mécanique quantique dans sa pratique de recherche. Il constitue donc un très bon exemple pour illustrer le fait que l'on peut utiliser cette théorie sans en adopter son « interprétation officielle ».

Ullmo tenta de dériver au moins une fois, en 1929, le formalisme quantique à partir d'un autre cadre conceptuel. Dans ce travail paru dans le *Journal de physique*, Ullmo exprime son insatisfaction vis-à-vis du statut qu'accorde la théorie dans son état actuel à l'onde imaginée initialement par Louis de Broglie :

« Lorsque Louis de Broglie a introduit ses « ondes de phase », il les concevait comme un phénomène ondulatoire accompagnant le point matériel. La nature de ce phénomène demeurerait cependant imprécise, et les développements ultérieurs de la théorie, par Schrödinger, puis par Dirac, la rendirent de moins en moins précise, au point qu'on finit par renoncer à lui trouver une signification précise<sup>505</sup>. »

Ullmo tente alors de fournir une interprétation électromagnétique de l'équation de Schrödinger, ainsi qu'un mécanisme assez original du phénomène des sauts quantiques : le potentiel électrique qui agit ou qui est émis par un électron est de la forme  $u = Ue^{\frac{2\pi i}{h}S}$ , où  $S$  est l'action d'Hamilton de l'électron. La recherche d'une solution à l'équation d'onde de  $u$  détermine alors les énergies possibles de l'électron. L'électron cependant n'émet et ne subit le champ  $u$  qu'au moment où l'action  $S$  est un multiple de  $h$ , ce qui signifie qu'il subit et émet  $E/h$  fois le champ  $U$  par seconde. Ullmo décrit alors l'émission de lumière par les électrons comme résultant de cette interaction discontinue de ces électrons entre eux par l'intermédiaire du champ  $u$ . À noter que cette tentative avait, d'après les notes de remerciement de Jean Ullmo à la fin de son texte, suscité l'intérêt de Paul Langevin ainsi que du mathématicien Paul Lévy.

Cette tentative de réinterprétation de la mécanique ondulatoire demeure cependant une parenthèse dans ses travaux de recherche, essentiellement consacrés à des sujets plus traditionnels comme l'étude de l'équation de Dirac. Mais Jean Ullmo ne sera cependant jamais adepte de « l'interprétation de Copenhague ». Il cessera d'être scientifiquement actif à partir des années 1930, mais continuera à s'intéresser aux questions d'interprétation de la mécanique quantique. Dès la fin des années 1940, Ullmo entreprend une étude de ce qui lui semble être l'argument le plus important des tenants de l'interprétation purement probabiliste de la mécanique quantique : le théorème de Von Neumann censé démontrer l'impossibilité d'expliquer l'indéterminisme quantique par notre ignorance des valeurs de certains paramètres nommés « variables cachées »<sup>506</sup>. Réfutant la portée de ce théorème (qui ne prouve, selon lui, que la cohérence interne de l'axiomatique quantique<sup>507</sup>), Ullmo entreprend à partir de ces années de défendre la thèse selon laquelle, bien que « par ses développements et les conquêtes qu'elle a permises sur la nature, [la mécanique quantique soit] le plus grand triomphe de

---

<sup>505</sup> Ullmo (1929).

<sup>506</sup> Voir annexe 3 sur Von Neumann.

<sup>507</sup> Ullmo (1955), p. 32.



l'esprit humain<sup>508</sup> », la mécanique quantique ne serait qu'une théorie statistique<sup>509</sup>, c'est-à-dire applicable seulement à « une collection de systèmes semblables, que la même préparation est susceptible de fournir tour à tour, sans qu'on puisse les affirmer rigoureusement identiques<sup>510</sup> ». De fait, et Ullmo l'admet, une telle interprétation statistique laisse la porte ouverte, et est même une incitation à la recherche d'une théorie plus profonde – une théorie structurelle, pour reprendre le vocabulaire d'Ullmo lui-même – portant sur les particules individuelles, une théorie qui serait en somme ce que la mécanique classique est à la thermodynamique statistique. Mais bien que suivant de près les tentatives que de Broglie et ses élèves entameront à partir du début des années 1950, Ullmo, lui, restera dans une position d'attente :

« [Ma démarche] revient, en regard de la théorie sous-jacente du système individuel, à la supposer sans la proposer<sup>511</sup> ».

Sans donc remettre en question l'efficacité de « l'axiomatique quantique », c'est à une critique interne de celle-ci, et notamment de sa signification et de sa portée scientifique et philosophique que Jean Ullmo va se consacrer au cours de ses écrits sur le sujet, comme il l'explique lui-même au début de son ouvrage *La crise de la physique quantique* :

« Il doit être clair que cette étude se poursuivra à l'intérieur de la mécanique quantique, dont nous devons présenter un schéma qui se suffise à lui-même<sup>512</sup> ».

Par ses discussions critiques sur ces questions, Jean Ullmo se réclamera d'avoir été un des précurseurs de la reprise du débat sur l'interprétation de la mécanique quantique qui sera particulièrement vif à partir du début des années 1950, particulièrement en France :

« I was the only one who maintained that idea, and except for teaching, I didn't do any real physics from the war on for personal reasons. So the only way in which I expressed those ideas was on the philosophical way when I fought against le theoreme de von Neumann. I wrote things on mecanique quantique, et la causalite and on le theoreme de von Neumann, and I think I succeeded in showing the contradictions inside those theories. But that was only a logical and philosophical point of view; that was not real physics. And at the time I knew I was quite alone, and that was, of course, one of the reasons why I didn't do physics, because it's very awkward to be the only one with these opinions in physics. When Vigier and de Broglie and Bohm came back to that point of view, they admitted that I had been the precursor, or let us say someone holding those views while no one dared to hold them for some time<sup>513</sup>. »

L'attitude d'Ullmo a donc consisté à prendre acte de l'avènement de la mécanique quantique et à circonscrire ses difficultés d'interprétation en les plaçant dans un cadre épistémologique permettant d'en comprendre la nature. Dans ce cadre, la mécanique quantique n'a pas tant besoin d'une interprétation alternative (puisque en tant que théorie statistique, elle restera valide) que de l'avènement d'une théorie des processus individuels. Mais se plaçant d'un point de vue plus

---

<sup>508</sup> *Ibid.*, p. 17

<sup>509</sup> Par opposition ici à « probabiliste ».

<sup>510</sup> *Ibid.*

<sup>511</sup> Ullmo (1955), p. 36.

<sup>512</sup> *Ibid.* p. 12

<sup>513</sup> Ullmo (1963).

épistémologue que physicien (et c'est en cela qu'il diffère de Vigier et de Louis de Broglie), il ne travaillera pas lui-même sur une telle théorie.

### 3- Instrumentalisation

Il s'agit ici de physiciens qui ont intégré avec enthousiasme au moins certaines caractéristiques de la mécanique quantique comme arguments positifs à l'appui de réflexions philosophiques plus larges. Ces physiciens ont toutefois souvent défendu des positions philosophiques très différentes, et leur seul point commun est de s'être servi de leur propre interprétation de la mécanique quantique à des fins philosophiques. Trois cas seront ici analysés : Langevin (à la suite de sa première réaction que nous avons déjà étudiée), son gendre Solomon et Léon Brillouin.

#### a) Langevin

Langevin a tenté, à partir des années 1930, de donner une dimension politico-idéologique à certaines caractéristiques de la mécanique quantique, en les intégrant dans une grille de lecture inspirée du Marxisme et du matérialisme dialectique. Refusant toujours que l'on érige l'indéterminisme en principe, Langevin prétend que ce qui remet en question la mécanique quantique n'est nullement le déterminisme en tant que tel, mais une conception mécaniste du monde, avec en corollaire, la mise en évidence de l'inadéquation du concept de corpuscule (comme le montrent les statistiques quantiques) ainsi que la mise en échec d'une classe bien particulière de déterminisme : le déterminisme Laplacien.

C'est en 1935, au cours de la Septième Semaine Internationale de Synthèse que Paul Langevin va débiter son instrumentalisation idéologique de la mécanique quantique. Désormais, l'avènement de cette dernière participe à un processus d'humanisation de la Science. En questionnant le déterminisme Laplacien, la mécanique quantique remet également en cause le fatalisme qui lui est inhérent : si l'avenir est tout entier contenu dans le présent, alors l'action humaine devient inutile. Au contraire, selon Langevin, « loin de conduire au fatalisme devant la marche inéluctable de l'Univers-projectile au sens de Laplace, le nouveau déterminisme est une doctrine de l'action, bien conforme au rôle que doit jouer la science, à ses origines, à ses buts. Tout d'abord, l'action devient possible puisque, grâce au halo ondulatoire, le présent ne détermine, ne contient l'avenir qu'avec une précision décroissante à mesure que celui-ci devient plus lointain : aucune connaissance du présent, si parfaite soit elle, ne permet de prévoir que des probabilités de plus en plus éloignées de la certitude à mesure que l'anticipation devient importante. De plus, les possibilités de prévision nécessaires pour diriger l'action et la rendre efficace augmentent avec l'importance de notre information et celle-ci exige l'intervention de l'observateur<sup>514</sup> ».

Olival Freire<sup>515</sup> et Bernadette Bensaude-Vincent notamment ont insisté sur le lien qu'entretenait cette position sur le nouveau déterminisme et « l'action » sociale et politique (notamment la lutte contre le fascisme puis le nazisme) qui occupait les principales préoccupations de Langevin à partir des années 1930. Le mouvement opéré par Langevin envers le matérialisme dialectique symbolise ce rapprochement. En 1945, Paul Langevin indique :

---

<sup>514</sup> Langevin (1935), note 13.

<sup>515</sup> Freire (1993).

« J'ai conscience de n'avoir bien compris l'histoire de la physique qu'à partir du moment où j'ai eu connaissance des idées fondamentales du matérialisme dialectique<sup>516</sup> ».

Il esquisse alors une histoire de la physique dans laquelle, le passage du matérialisme mécanique au matérialisme dialectique correspond au passage du déterminisme Laplacien « qui nous pousse vers la contemplation plutôt que vers l'action », caractéristique de la science du XIX<sup>e</sup> siècle, au nouveau déterminisme, que symbolise la nouvelle physique (notamment la physique quantique) et la théorie de l'évolution. Cette nouvelle vision des sciences permet de comprendre l'histoire de la physique comme un processus en perpétuelle évolution dans lequel des contradictions sont surmontées par des synthèses. La dernière en date est celle de la synthèse entre onde et corpuscule : « elle n'est pas encore achevée. Elle sera l'œuvre des années qui viennent et marquera pour notre physique un progrès essentiel ».

#### b) Solomon

Jacques Solomon fut sans doute une personne décisive dans le tournant de son beau-père vers le matérialisme dialectique. Adhérant au parti communiste français en 1933, c'est pour reprendre son flambeau que Paul Langevin, à la suite de sa mort et de la seconde guerre mondiale, s'engagea lui-même au sein du parti<sup>517</sup>. Ami de Léon Rosenfeld, il avait en commun avec lui l'idée d'unir l'interprétation bohrienne de la mécanique quantique et le matérialisme dialectique, auquel il avait été initié grâce à un autre ami, le philosophe George Politzer<sup>518</sup>. Contrairement à Rosenfeld et à Langevin, ses écrits sur l'interprétation de la mécanique quantique sont peu nombreux et on peut conjecturer que ces problèmes n'ont trouvé qu'une petite place au sein de ses préoccupations par ailleurs très nombreuses pendant la décennie de son activité en physique. Il lutta cependant nettement contre deux tendances (pourtant antagonistes) qui ont perpétuellement nourri le débat philosophique quantique : l'idéalisme (auquel on pourrait ajouter le spiritualisme) et le retour au déterminisme par l'introduction de variables cachées.

Pour comprendre cette position, il me semble qu'il faut préciser quel sens Solomon (tout comme Rosenfeld) attribuait au terme « idéaliste » (en opposition au matérialisme). En réalité, la lutte contre l'idéalisme qu'engageait Solomon visait deux types d'interprétations qui concernent d'ailleurs deux niveaux différents de la mécanique quantique. Le premier type concerne les interprétations spiritualistes ou animistes de la mécanique quantique, c'est-à-dire les tentatives d'attribuer une volonté aux objets quantiques afin d'expliquer leur comportement indéterministe (comme l'illustre la phrase prononcée par Dirac lors du Conseil Solvay de 1927 selon laquelle « la nature fait un choix<sup>519</sup> »), mais aussi les tentatives d'interpréter le libre arbitre humain par l'indéterminisme quantique, ou encore celles faisant intervenir une action de l'esprit sur la matière. Proche de l'Union Rationaliste dont Paul Langevin était un des fondateurs, il n'est pas difficile de comprendre son hostilité par rapport à ce genre d'interprétations. Le second type concerne davantage le formalisme mathématique de la mécanique quantique, et son caractère abstrait. Il peut être résumé par la position que Solomon attribue

---

<sup>516</sup> Langevin (1945).

<sup>517</sup> Bensaude-Vincent (1987).

<sup>518</sup> Philosophe d'origine hongroise, il est à l'origine avec Solomon d'un réseau de résistance universitaire dans le cadre duquel ils feront notamment publiés *l'Université libre* et *la Pensée libre*. Les deux compagnons sont arrêtés et exécutés par les Allemands en 1942 au Mont Valérien.

<sup>519</sup> Conseil Solvay (1927).

à Gaston Bachelard dans le « Nouvel esprit scientifique<sup>520</sup> », qui consiste à défendre une sorte de préséance de la pensée mathématique sur la rencontre « matérielle » entre l'être humain et le réel. Pour Solomon au contraire, ce n'est pas à la réalité de se conformer à la pensée mathématique, mais l'inverse. Solomon critique ainsi Bachelard dans sa proposition de prendre au sérieux le concept de probabilité négative ou celui de masse négative qui semblaient être suggérées par les découvertes des équations de la mécanique ondulatoire relativiste :

« M. Bachelard voit les choses à l'envers. Il construit un labyrinthe de concepts pour essayer de tirer la réalité de la tête du physicien, cependant que le physicien s'efforce de tirer sa pensée de la réalité [...]. C'est le réel, en vrai, qui dicte les mathématiques<sup>521</sup>. »

Outre cette double critique du spiritualisme et de l'idéalisme, Solomon lutte, avons-nous dit, contre l'incorporation de variables cachées en physique quantique. J'ai déjà mentionné, au chapitre précédent, sa preuve de l'impossibilité des variables cachées de 1933, preuve qui succède de peu celle de John Von Neumann, mais qui contient toutefois des erreurs formelles qui l'invalident. Or, c'est toujours au nom de la rationalité que Solomon critique ces variables cachées :

« En somme, nous remplaçons le système parfaitement logique de la mécanique quantique, mais d'où la causalité au sens classique est exclue, par un autre système parfaitement déterministe mais comportant l'hypothèse d'éléments naturels inconnus. Irrationnel pour irrationnel, l'avantage est assez médiocre. »

Ce rejet des variables cachées peut trouver écho avec son refus de considérer les créations théoriques des physiciens comme ayant la préséance sur la rencontre entre le physicien et la réalité (c'est-à-dire l'expérience). Comme le feront un certain nombre de critiques marxistes à propos de la théorie à variables cachées de Louis de Broglie et Jean-Pierre Vigier, dénoncée comme issue tout droit de leur imagination et sans répondant expérimental (et donc, dans un sens très spécial, « idéaliste »<sup>522</sup>), c'est sans doute au nom d'un même refus de l'idéalisme et de l'irrationalisme que Solomon critique ce genre d'approches. On peut donc voir une certaine unité dans sa démarche<sup>523</sup>.

### c) Léon Brillouin

Léon Brillouin n'a pas vraiment développé de réflexions originales autour de l'interprétation de la mécanique quantique. Même s'il s'est préoccupé de près à certaines questions philosophiques connexes à la science de son époque, ses réflexions les plus profondes ont été consacrées à des sujets touchant plutôt à la thermodynamique, à la cybernétique et aux relations entre matière et esprit. Comme chez beaucoup de physiciens, sa vision philosophique sur la théorie quantique semble n'avoir eu que des conséquences marginales, si ce n'est inexistantes, sur son appropriation de la théorie

---

<sup>520</sup> Bachelard (1934).

<sup>521</sup> Solomon (1945).

<sup>522</sup> Chose assez ironique, puisque c'est explicitement pour combattre l'idéalisme que Vigier et de Broglie défendent leur théorie à variables cachées. Il faut cependant remarquer que les débats sur ces questions n'étaient, dans un contexte idéologiquement très chargé, pas exempts de mauvaise foi et que les termes dans lesquels chaque contradicteur essayait de poser le débat n'avaient souvent pas le même sens pour chacun d'entre eux.

<sup>523</sup> Cependant, comme le montre de manière convaincante Cécile Colin (2010), une analyse de sa défense de l'interprétation de Bohr dans des textes où il fait référence à des expériences de pensée bien définies montre que sa pensée n'est pas exempte d'obscurités.

quantique dans ses travaux de recherches, à un tel point qu'il ne serait pas paru complètement erroné de classer ce physicien parmi les « indifférents ». Mais il m'a semblé cependant que ses quelques réflexions sur la théorie quantique s'inscrivaient dans une démarche plus globale qui l'orientait vers une certaine forme de positivisme.

Pourtant, les premières réactions connues de Léon Brillouin aux problèmes d'interprétation de la mécanique quantique semblent plutôt révéler une pensée non positiviste. Ainsi, lors du Conseil Solvay de 1927, Léon Brillouin fut un des rares à, si ce n'est soutenir, du moins protéger Louis de Broglie et sa théorie de l'onde pilote contre les attaques qui lui étaient adressées<sup>524</sup>.

Mais, semble-t-il, c'est surtout dans des périodes plus tardives de sa carrière que Brillouin commence à développer une pensée épistémologique plus élaborée, qu'il présente dans son ouvrage *Vie, Matière et Observation*<sup>525</sup>. Léon Brillouin s'y montre extrêmement critique quant à la portée des idéalizations théoriques :

« Que vaut, à vrai dire, une théorie ? Ce n'est certainement pas une image fidèle de la réalité. C'est une représentation, sur laquelle nous pouvons raisonner logiquement, et qui s'adapte (tant bien que mal) aux faits empiriques. [...] Une théorie physique n'est qu'une carte d'une portion du monde extérieur. Gardons-nous de lui donner plus d'importance qu'elle n'en possède<sup>526</sup>. »

Dans ces conditions, les fondements de la science ne peuvent être que l'expérience humaine. Brillouin suit ainsi « la sagesse profonde de la philosophie » de P.W. Bridgman<sup>527</sup>, selon laquelle « un expérimentateur ne devrait parler d'une quantité s'il n'est pas capable de dire comment il peut observer et mesurer cette grandeur ». Les « principes » que le scientifique tente de dégager à partir de l'expérience ne méritent pas le piédestal sur lequel on les place du moment où aucune expérience pratiquement réalisable ne pourrait venir confirmer ou infirmer ses énoncés. Par exemple, les discussions que l'on a eues fréquemment sur la réversibilité des « lois de la nature » ou le déterminisme physique ne sont que des discussions sur des chimères.

C'est dans ce cadre de pensée qu'interviennent les réflexions de Léon Brillouin au sujet de la mécanique quantique. Mais les arguments qu'il tire de la mécanique quantique ne viennent que se surajouter à des arguments que d'autres domaines de la physique rendaient déjà disponibles. Ainsi, pour montrer l'aspect chimérique du démon de Laplace<sup>528</sup>, et ainsi reléguer la question du déterminisme hors de la science, Brillouin montre que, partant du fait que le déterminisme ne peut se démontrer expérimentalement qu'à la condition de pouvoir mesurer avec une précision aussi grande que nécessaire toutes les grandeurs caractérisant l'état présent, ces conditions ne peuvent en aucun cas être respectées pour trois raisons essentielles :

---

<sup>524</sup> Conseil Solvay (1928), Discussions du rapport de Louis de Broglie.

<sup>525</sup> Léon Brillouin (1959).

<sup>526</sup> *Ibid.*, p. 172.

<sup>527</sup> Physicien américain lauréat du prix Nobel de physique de 1946 « pour l'invention d'appareils capables de produire des pressions extrêmement élevées, et pour les découvertes qu'il a faites dans le champ de la physique à haute pression », il est également connu pour ses écrits en philosophie de la physique ((1927), *The Logic of Modern Physics*, New York, Macmillan, et (1936), (1936), *The Nature of Physical Theory*, Princeton University Press) dans lesquels il dégage une pensée opérationnaliste.

<sup>528</sup> Dans l'introduction de son *Essai philosophique sur les probabilités* (1814), Laplace écrit la phrase qui restera comme l'explicitation la plus célèbre de ce que l'on entend pas « déterminisme » : « Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux. ».

1. La théorie de l'information<sup>529</sup> indique qu'une mesure infiniment précise demande l'utilisation d'une néguentropie<sup>530</sup> infinie, ce qui aurait pour corollaire de détruire le système.

2. Le principe d'incertitude indique que l'on ne peut pas déterminer simultanément la grandeur d'un couple de variables conjugués, dont la connaissance est cependant nécessaire à la prédiction de l'état ultérieur du système.

3. Il est impossible de mesurer en dessous d'une certaine limite de précision la position d'une particule<sup>531</sup>.

Ainsi, c'est surtout par l'évocation du principe d'incertitude que Brillouin intègre la question de la mécanique quantique dans son raisonnement philosophique. Dans un usage opérationnaliste de la théorie, dans laquelle celle-ci n'a pas vocation à décrire le réel, mais seulement à servir de guide pratique à l'usage de l'expérience, ce sont les contraintes qu'impose tout acte de mesure à la capacité de prédiction de l'homme qui intéressent Brillouin en premier lieu. Sous cet angle, la question du déterminisme est renvoyée à de vaines querelles métaphysiques.

Par ailleurs, Brillouin n'a pas dégagé une interprétation originale de l'acte de mesure quantique, et reprend à son tour la « méta-image » de l'interaction incontrôlable entre l'objet et l'appareil de mesure, avec toute l'ambiguïté que sa mobilisation entraîne :

« La raison [du principe d'incertitude] en est simple : pour des distances  $\Delta x$  minuscules il n'y a plus aucune règle rigide que nous puissions employer ; il faut mesurer cette distance au moyen d'une longueur d'onde  $\lambda$  très courte. Une discussion précise prouve que la longueur d'onde la plus favorable est

$$\lambda = 2\Delta x ; \quad \nu = \frac{c}{2\Delta x}$$

Ce qui donne un quantum  $h\nu$  très élevé et une grosse impulsion de recul  $\frac{h}{\lambda}$  de direction inconnue, au moment de la mesure<sup>532</sup>. »

Brillouin reprendra également à son compte la notion de complémentarité de Bohr. Reconnaissant que les modèles théoriques forgés par l'être humain ne peuvent pas prétendre s'appliquer parfaitement à la nature, le modèle de l'onde et celui du corpuscule peuvent néanmoins être utilisés dans le domaine de la physique microscopique, à condition de respecter les limites de leur utilisation simultanée fixée par les relations d'incertitude.

Brillouin semble donc partager l'idée que la complémentarité de Bohr permet de résoudre les problèmes philosophiques fondamentaux posés par la théorie quantique. Cependant, comme Bohr l'a lui-même reconnu, peu de personnes qui se réclamaient de sa philosophie n'en ont compris toutes les subtilités. Une anecdote illustre le fait que Brillouin ait pu faire un certain nombre de mauvaises

---

<sup>529</sup> Théorie amorcée par les travaux de Claude Shannon à la fin des années 1940 et à laquelle Brillouin apporta d'importantes contributions.

<sup>530</sup> Une néguentropie est une entropie négative. Ce concept est lié étroitement au concept d'information, un système à forte entropie étant un système pour lequel peu d'informations sont disponibles. D'après le second principe de la thermodynamique, l'entropie globale ne peut pas diminuer, si bien que l'utilisation de néguentropie a pour corollaire une augmentation de l'entropie globale au moins aussi importante.

<sup>531</sup> Brillouin fait ici référence à un résultat de la physique quantique relativiste que l'on peut résumer ainsi : la localisation précise d'une particule nécessite l'utilisation d'un rayonnement de très haute fréquence. Si l'énergie de ce rayonnement dépasse un certain niveau, il y a alors assez d'énergie disponible pour permettre la création de paires de particule-antiparticule. La première particule sera indiscernable d'une autre particule créée pendant le processus, et l'on ne pourra ainsi pas prétendre que l'on a mesuré la position de *cette* particule.

<sup>532</sup> Brillouin (1959), pp. 178-179.



interprétations concernant la pensée de scientifiques dont il se sentait intellectuellement proche : alors qu'il tente dans son livre de faire un rapprochement entre la philosophie de Bohr et celle de Schrödinger, il recevra une lettre de Schrödinger le rappelant sévèrement à l'ordre<sup>533</sup>. Schrödinger n'appréciait particulièrement pas la pensée de Niels Bohr et s'offusquait qu'on puisse la confondre avec la sienne !

#### 4- Consolidation

##### a) Edmond Bauer

Premier physicien à avoir entendu parler de quanta en France, Edmond Bauer est également un des Français les plus impliqués dans les discussions philosophiques autour de la mécanique quantique. Il fut, en compagnie de Louis de Broglie et Paul Langevin, le physicien qui participa le plus aux discussions qui prenaient place entre physiciens et philosophes, que ce soit dans le cadre de réunions sous l'égide de la Société Française de Philosophie<sup>534</sup> ou au Centre de Synthèse<sup>535</sup>. Surtout, il publia en collaboration avec Fritz London une théorie de la mesure quantique qui annonce, dans la lignée de John Von Neumann ou d'Eugène Wigner, l'intervention de la conscience dans ce processus.

Edmond Bauer livre une première analyse complète de la question de l'interprétation de la mécanique quantique en 1932 à l'occasion de la Quatrième Semaine Internationale de Synthèse<sup>536</sup>. Retraçant pour cela l'histoire de la physique, il analyse ce qu'apportent les deux bouleversements que connaît la physique du début du XX<sup>e</sup> siècle à la philosophie.

Bauer rappelle qu'au moment où il était étudiant, la vision de la plupart des physiciens correspondait à une métaphysique très simple, celle d'un réalisme naïf : leur univers était la transposition de l'univers familier en plus simple et moins coloré. La première révolution qui remet en cause cette vision du monde est la relativité. Pour Bauer, cette révolution se fait en deux temps : une phase critique « positiviste » et une phase de reconstruction d'une nouvelle ontologie. La première phase peut être résumée par la phrase operationaliste : « Toute question à laquelle l'expérience ne saurait répondre est dénuée de sens ». Bauer précise qu'il ne s'agit pas de distinguer les expériences possibles et impossibles, mais de distinguer les questions qui peuvent en principe se poser, c'est-à-dire qui sont bien définis dans le cadre de la théorie, et celles qui ne le sont pas. Il ne s'agit donc pas d'interdire les expériences de pensée, par ailleurs largement utilisées par Einstein dans la construction de cette théorie. En revanche, une question se référant à la mesure de la position et de la vitesse d'une portion d'éther ne peut pas être posée, car elle n'a expérimentalement aucun sens. La deuxième phase, celle de la reconstruction, est pour Bauer « l'envers, le complément nécessaire de son aspect critique

---

<sup>533</sup> Mosseri (1999), p. 207. La lettre en question date du 16 Octobre 1959 (Archives Brillouin, Niels Bohr Library, American Institute of Physics.)

<sup>534</sup> Société créée en 1901 par Xavier Léon et André Lalande. Cette société organise notamment de nombreuses conférences, suivies de discussions, dans le domaine de la philosophie des sciences. Des physiciens comme Jean Perrin, Paul Langevin, Albert Einstein et Louis de Broglie y ont discuté les implications philosophiques de leurs travaux. Ces conférences sont disponibles sur internet à l'adresse suivante : <http://www.sofrphilos.fr/?idPage=34>.

<sup>535</sup> Le Centre de Synthèse est une institution créée par l'historien Henri Berr dans les années 1920. Elle publie notamment la *Revue de synthèse* qui regroupe des articles portant notamment sur l'historiographie (générale) et la philosophie des sciences, et organise annuellement des congrès (les Semaines de Synthèse) portant sur une thématique précise (par exemple, la 4<sup>ème</sup> semaine de synthèse (1932) est consacrée à *L'Évolution de la physique et la philosophie* (Paris, Alcan, 1935).

<sup>536</sup> Edmond Bauer (1932).

[car] les principes « positivistes » qui en sont la base nous conduisent à forger une nouvelle « réalité » plus vraie que l'ancienne<sup>537</sup> ». Et cette nouvelle réalité, Bauer ne met pas longtemps à la découvrir :

« Ce sont ces lois et ces grandeurs invariantes qui, dans la nouvelle théorie, représentent la réalité profonde que cherche le physicien sous les apparences sensibles. Réalité et invariance sont synonymes<sup>538</sup> »

Bauer remarque ainsi que la théorie relativiste, bien qu'elle dépasse le cadre de notre capacité de représentation intuitive, reste « une théorie réaliste<sup>539</sup> ».

Bauer en vient alors à la théorie des quanta, dont la place qu'elle accorde au concept d'onde et de corpuscule est le premier trait saillant. L'auteur indique toute la méfiance qu'il faut conserver vis-à-vis de ces deux concepts :

« [...] tant que l'on se raccroche aux images classiques, ces deux aspects sont nettement antinomiques. Il faut donc abandonner ce genre d'images, ou du moins cesser de croire qu'elles sont conformes à la « nature des choses » et les considérer seulement comme des modèles grossiers et incomplets<sup>540</sup> ».

Esquissant l'interprétation probabiliste de l'onde, Bauer aborde ensuite le thème qui semble avoir le plus focalisé l'attention des physiciens sur la mécanique quantique : le principe d'incertitude d'Heisenberg. Une nouvelle fois, Bauer en fait une présentation très « orthodoxe », dans la lignée de celle que nous avons lue dans les textes de Brillouin ou Proca, mais qui se retrouve en réalité sous la plume de pratiquement tous les physiciens des années 1930 qui ont abordé la question :

« Par suite de la valeur finie de la constante d'action  $h$ , cette mesure fait généralement subir à l'état du système étudié et aux ondes associées une modification finie, discontinue. Celle-ci peut se prévoir par le calcul : mais elle entraîne un changement si complexe de la plupart des grandeurs physiques – sauf celle qui vient d'être mesurée et de quelques autres qui « sont commutables avec elle » - que nous ne pouvons pas leur attribuer de valeurs définies. Les équations de la mécanique ondulatoire nous permettent seulement de calculer avec quelle probabilité une nouvelle expérience nous fournira telle ou telle valeur possible<sup>541</sup> ».

Faisons deux remarques sur ce passage. La première est, qu'ici encore, Bauer suggère une nouvelle fois la « méta-image » de l'interaction appareil-système. La deuxième est que Bauer indique que la mesure entraîne un changement des grandeurs physiques, sauf celle qui vient d'être mesurée. Il est donc difficile d'interpréter la phrase autrement que comme signifiant que la grandeur avait déjà, avant la mesure, la valeur qui a été révélée par elle. Nous pourrions ainsi, partant de cette phrase, faire légitimement le raisonnement suivant. La mécanique quantique prescrit à un système physique une fonction d'onde qui peut se mettre sous la forme d'un développement en série des valeurs propres  $o_i$  de l'opérateur correspondant à l'observable  $O$  :

$$|\psi\rangle = \sum_i c_i |o_i\rangle$$

---

<sup>537</sup> Bauer (1932), p. 10.

<sup>538</sup> *Ibid.* p. 10.

<sup>539</sup> *Ibid.* p. 13.

<sup>540</sup> *Ibid.* p. 15.

<sup>541</sup> *Ibid.* p. 32.

Après la mesure, nous trouvons une des valeurs  $o_n$ . Si donc la mesure n'a pas perturbé la valeur de la grandeur qui vient d'être mesurée, nous sommes logiquement en droit de penser que la valeur était  $o_n$  avant la mesure. Comme l'attribution de cette valeur n'est en général pas renseignée par l'expression de la fonction d'onde  $|\psi\rangle$  (sauf dans le cas très particulier où tous les  $c_i$ , à part  $c_n$ , sont égaux à zéro), nous pouvons déduire que la fonction d'onde n'est pas une description complète du système. Mais une nouvelle fois, Bauer va « dérober d'une main la représentation méta-imagée qu'il avait laissé entrevoir de l'autre<sup>542</sup> ». Cette stratégie est exprimée d'une manière extrêmement claire dans le texte. Il me suffira de citer le long passage suivant pour l'illustrer :

« Il est facile de comprendre pour quelle raison beaucoup plus simple [qu'une hypothèse d'Eddington, discutée juste avant par Bauer, du libre arbitre des objets atomiques] il nous est interdit par la théorie quantique aussi bien de nous représenter que de prévoir une transformation radioactive individuelle. Admettons pour un moment qu'il existe dans le noyau un mécanisme physique précis qui déclencherait son explosion, par exemple lorsque ses constituants passeraient par une certaine configuration critique. Pour calculer *a priori* l'époque d'un tel phénomène, il faudrait connaître une configuration antérieure à un instant quelconque et, pour cela, regarder à l'intérieur du noyau. Nous possédons en principe des dispositifs qui permettraient de mener à bien cette expérience, mais, par suite de la valeur finie du quantum d'action  $h$ , les moyens à employer devraient être si puissants qu'ils provoqueraient une destruction immédiate du noyau étudié.

Toute prévision est donc impossible, toute description vaine. Nous ne pouvons même pas savoir si notre hypothèse d'un mécanisme physique interne, qui serait la cause sous-jacente des désintégrations radioactives individuelles, est vraie ou fausse. Nous n'avons aucun moyen ni de le vérifier, ni de l'infirmer.

L'analyse précédente fait bien comprendre un caractère fondamental de la physique quantique et ce qui contribue à en faire un édifice logique parfaitement harmonieux : l'insuffisance de notre description spatio-temporelle de la nature est en connexion si étroite avec le principe d'incertitude, que la théorie nous permet de faire toutes les prévisions qui sont effectivement vérifiables par l'expérience et celles-là seulement. Quand elle est impuissante, c'est que l'expérience de vérification est impossible. Par conséquent, se demander si les phénomènes atomiques sont « en réalité » contingents ou déterministes est dénué de sens, car nous ne saurions imaginer l'expérience qui pût trancher la question<sup>543</sup> ».

On voit encore une fois à l'œuvre à travers ce passage cette hésitation entre une position rationaliste, née du besoin de « comprendre pour quelle raison », et qui donc ne peut s'empêcher d'imaginer un mécanisme qui explique la situation, et une attitude positiviste, qui finalement l'emporte en balayant l'explication qui a déjà réalisé son œuvre consistant à rassurer la Raison. Ceci semble explicitement exprimé dans le premier paragraphe du passage. La logique de l'argumentation de Bauer peut être schématisée ainsi : 1) On cherche une raison pour comprendre notre incapacité à prédire 2) On en trouve une que l'on reconnaît hypothétique 3) Celle-ci explique effectivement pourquoi nous ne pouvons pas prédire 4) Nous sommes satisfaits de cette explication qui explique en même temps pourquoi nous ne pouvons pas la vérifier 5) Nous sommes en tout état de cause positiviste, et nous n'avons pas besoin de cette explication.

Cette argumentation est cependant assez curieuse : elle débute par la reconnaissance (au moins implicite) du besoin d'expliquer et se termine par l'énonciation de l'inutilité d'une telle explication. La question est alors : pourquoi passer par une hypothétique explication, par ailleurs jugée illégitime par le positivisme, si ce n'est justement pour rassurer la Raison ?

<sup>542</sup> Pour reprendre l'expression de Bitbol.

<sup>543</sup> Bauer (1932), pp. 36-37.

Une autre remarque semble pouvoir être faite, à propos de la différence entre la situation laissée par la théorie de la relativité et celle laissée par la théorie quantique. La leçon de la théorie de la relativité que semblent avoir retenue les partisans de l'interprétation Bohrienne (et au premier rang desquels on retrouve Bohr lui-même et Heisenberg) est celle de la définition opératoire d'une grandeur<sup>544</sup>. Bohr par exemple a insisté sur le fait que la situation en mécanique quantique ne différerait pas essentiellement de la situation en relativité<sup>545</sup>. Pourtant, comme l'indique de manière très pertinente Edmond Bauer, la théorie de la relativité a connu une phase de reconstruction ontologique. Ainsi, si « une question se référant à la mesure de la position et de la vitesse d'une portion d'éther ne peut pas être posée », c'est certes « car elle n'a expérimentalement aucun sens », mais c'est également parce qu'à l'intérieur du cadre de la relativité, elle n'a en outre conceptuellement aucun sens (l'éther n'existe pas dans le cadre de la relativité, justifiant la maxime d'Einstein selon laquelle c'est bien la théorie qui décide ce qui est observable en principe). Or, la phase de reconstruction ontologique relativiste n'a aucun pendant quantique, d'où une situation dans laquelle on maintient par fragment une ancienne ontologie, reconnue comme inadaptée, et dans laquelle on s'interdit ainsi de poser des questions qui ont pourtant bien un sens précis dans le cadre conceptuel dont sont issus les termes qui la composent (c'est-à-dire la physique classique). Il existe donc une grande différence entre le statut de la question se référant à la position et la vitesse d'une portion d'éther et celle se référant aux mêmes priorités d'une particule subatomique. L'impossibilité de mesurer les premières n'a pas besoin de justification, l'ontologie relativiste la fournit d'elle-même. Au contraire, tout se passe comme si, chez les physiciens qui recourent à la méta-image de l'instrument perturbateur, l'impossibilité de mesurer simultanément les deux grandeurs conjuguées avait besoin d'une justification, justification que l'ontologie quantique ne fournit pas d'elle-même (puisqu'étant inexistante). C'est donc, par défaut, implicitement dans le cadre conceptuel de la mécanique classique que la recherche d'une telle justification est cantonnée. Or, pour reprendre le parallèle avec la relativité, une telle démarche revient à se mettre vis-à-vis de la mécanique quantique dans la même situation que celle dans laquelle les électrodynamiciens de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle se trouvaient vis-à-vis de la théorie de la relativité : donner une explication non-relativiste à l'impossibilité de mesurer la vitesse de l'éther (par exemple en faisant appel à un mécanisme propre à l'éther qui empêcherait qu'on mette en évidence sa vitesse). *In fine*, en l'absence de l'accomplissement de la phase de reconstruction ontologique, le refuge derrière une position positiviste pleinement assumée devient pour beaucoup de ces physiciens la seule solution disponible.

Bauer reviendra sur l'interprétation de la mécanique quantique avec Fritz London en 1939. Cette fois-ci, les auteurs ne se réfugient pas derrière l'échappatoire positiviste, et réfutent explicitement l'hypothèse d'un mécanisme caché :

« On peut se convaincre que les distributions statistiques, telles qu'elles sont données par la mécanique quantique et confirmées par l'expérience, ont une structure telle qu'elles ne peuvent pas être réduites à l'aide de paramètres cachés. Il ne s'agit pas, comme on l'a souvent prétendu, d'une question d'interprétation philosophique : la mécanique quantique devrait être fausse objectivement, si les processus atomiques étaient déterminés en réalité et seulement connus incomplètement<sup>546</sup> »

<sup>544</sup> Par exemple la définition par Einstein de la simultanéité en référence à une opération de synchronisation des horloges.

<sup>545</sup> Bohr (1938).

<sup>546</sup> Bauer, London (1939), p. 7. Les auteurs font ici implicitement référence au théorème de Von Neumann.

L'analyse du processus de mesure et d'observation est cette fois-ci effectuée en des termes plus spiritualistes ou idéalistes que positivistes. L'étude intégralement quantique d'une mesure montre que l'état quantique de l'appareil devient lui-même une superposition après la mesure. Pour que cette chaîne s'arrête, selon les deux auteurs, il faut l'intervention de l'observateur, qui, par introspection, analyse son propre état mental et le découvre dans un état bien déterminé, correspondant au résultat de la mesure qu'il observe. Ce n'est donc plus une interaction qui permet d'attribuer une nouvelle fonction d'onde à l'objet, mais l'existence d'un « moi » qui se sépare de la fonction d'onde initiale et établit une nouvelle objectivité en attribuant à l'objet la fonction d'onde qui correspond à la valeur de la grandeur mesurée. Ce genre d'idées prendra une coloration explicitement spiritualiste chez de nombreux auteurs, mais il est difficile d'établir si une telle attribution peut être légitimement faite à Edmond Bauer. D'une part, il n'écrit pas seul le texte, d'autre part, une lecture plus positiviste peut être faite de ce texte, en attribuant à la conscience le rôle épistémique du sujet connaissant et non pas le rôle métaphysique d'une identité immatérielle agissante<sup>547</sup>.

Finalement, le positivisme de Bauer apparaît encore au moment de la réorientation de Louis de Broglie vers sa théorie de la double solution. En 1953, Louis de Broglie expose sa nouvelle position devant un panel de physiciens et de philosophes dans lequel nous retrouvons Gaston Bachelard, Jean Ullmo, Jean-Louis Destouches et donc Edmond Bauer. Ce dernier se déclare très intéressé par les nouveaux travaux de Louis de Broglie et de son élève Jean-Pierre Vigier, et indique également « comme beaucoup de physiciens, [avoir] éprouvé les mêmes inquiétudes que lui depuis vingt-cinq ou trente ans ». Cependant, les deux physiciens ne semblent pas s'accorder sur la signification du terme « réalité physique » :

« **M. Bauer** : [...] Il y a d'abord un mot que vous employez souvent, en particulier quand vous parlez de vos ondes  $u$  : vous parlez de réalité physique ; le mot de réalité physique doit avoir, ici, un sens particulier. Si vous voulez, c'est un problème philosophique, que je ne résoudrai pas, mais je vous pose la question : que faut-il entendre par réalité physique ?

**M. de Broglie**. — Je vous dirai que l'onde  $u$  est quelque chose qui est indépendant de l'observateur, elle n'est pas comme l'onde  $\psi$ , qui varie avec une information. L'onde  $u$  serait un élément physique qui, en chaque point de l'espace-temps, serait représentée par une fonction de  $x, y, z, t$  peut-être complexe, mais bien déterminée.

**M. Bauer**. — Oui, mais alors, c'est une réalité physique d'une nature un peu spéciale. Vous avez dit, à un moment donné : cette réalité physique dépend de paramètres cachés, qui seront toujours inaccessibles à l'expérience. Or, une réalité physique qui est indépendante de l'expérience, ne peut tout de même pas être qualifiée de réalité physique... C'est là une différence de point de vue<sup>548</sup>. »

## b) Jean-Louis Destouches

Présent lors de l'échange entre ces deux hommes, Jean-Louis Destouches fut dès le début de sa carrière un fervent défenseur de l'interprétation de la mécanique quantique en termes de complémentarité. Il indique par exemple en 1953 :

<sup>547</sup> C'est, semble-t-il, plutôt dans ce sens que Roland Omnès, qui lutte contre les déviances spiritualistes inspirées par les théories quantiques mais qui, par ailleurs, a connu personnellement Edmond Bauer, ayant collaboré avec lui à la traduction d'un livre de Niels Bohr, interprète la pensée de Bauer. Voir Omnès (2002).

<sup>548</sup> De Broglie (1953-B), p. 477.

« J'arrivais à la première leçon professée par M. de Broglie, [...] pour entendre parler pour la première fois de la théorie de la quantification dans la nouvelle mécanique, de la complémentarité de Bohr, et de toutes les conséquences extraordinaires de ces vues nouvelles pour l'avenir de la science. Il y avait bien là de quoi susciter des vocations et de quoi pousser dans la voie de la recherche ceux qui avaient la chance de bénéficier de cet enseignement<sup>549</sup> ».

Fasciné donc par les aspects les plus novateurs de la nouvelle théorie, et conquis par les thèses de Bohr que lui présentait alors Louis de Broglie, Destouches ne se contenta cependant pas, contrairement à de nombreux défenseurs de la complémentarité, de paraphraser – souvent d'ailleurs en déformant ses propos – l'illustre Danois. En utilisant notamment une approche axiomatique formelle, il chercha au contraire à donner une signification plus précise à ses idées quand celles-ci restaient généralement d'ordre très qualitatif. Il montre ainsi en 1938 que les situations dans lesquelles la notion de complémentarité intervient peuvent être systématiquement associées à celles dans lesquelles un certain type d'unification théorique a été entrepris.

Destouches indique qu'il existe deux sortes d'unification théorique. La première, la moins problématique, concerne deux théories dont les domaines d'application sont disjoints et dans lesquelles aucune proposition de la première théorie ne contredit une proposition de la seconde. Dans ce cas, « il existe une théorie englobante, ayant pour termes primitifs la réunion des termes primitifs et pour [...] axiomes le produit logique de tous les axiomes de la théorie<sup>550</sup> ». Mais un second type d'unification concerne les cas où deux théories comportent des propositions incompatibles, comme c'est le cas notamment pour la théorie ondulatoire et la théorie corpusculaire de la lumière et de la matière. Dans ce cas, il existe toujours une théorie unifiante « dont la construction est payée de certaines modifications à la logique, d'un affaiblissement des règles de raisonnement, par lequel sont interdites certaines déductions<sup>551</sup> ». Ces modifications peuvent concerner la possibilité même d'énoncer certaines propositions sur des grandeurs physiques lorsque la situation étudiée implique la mise en place d'un agencement expérimental incompatible avec leur mesure. C'est la complémentarité de Bohr. La mécanique quantique se voit ainsi intégrée à une classe générale de théories unifiant formellement deux théories incompatibles<sup>552</sup>.

Convaincu donc par l'interprétation Bohrienne de la mécanique quantique, Destouches accueille avec circonspection le revirement de Louis de Broglie au début des années 1950. Il tenta dans un premier temps d'en montrer l'inanité, en se référant notamment au théorème de Von Neumann et également à celui dû à Solomon sur l'impossibilité d'interpréter la théorie en termes de variables

---

<sup>549</sup> Destouches (1953), p. 72.

<sup>550</sup> Destouches (1939), p. 64

<sup>551</sup> Destouches (1947).

<sup>552</sup> Destouches formalise ici une des intuitions les plus importantes de la pensée Bohrienne sur la mécanique quantique et anticipe, comme le souligne Bitbol, un théorème qui sera découvert par Kochen et Specker en 1967 portant sur l'impossibilité d'une théorie à variables cachées non-contextuelles qui reproduirait les résultats de la mécanique quantique. Au vu de l'intérêt que peut avoir ce résultat pour l'étude des fondements de la mécanique quantique, il est saisissant de constater le genre de réactions qu'il a suscité chez un physicien comme Anatole Abragam, que nous citons ici : « J'espère ne pas le trahir en citant de mémoire un de ses grands théorèmes : « Étant donné deux théories T et T' dont les prédictions sont contradictoires, on peut toujours les réunir dans une théorie plus générale T'' qui n'est pas soumise à l'exigence de non-contradiction. » Pour quelques mois je ne comprenais rien, puis je compris qu'il n'y avait rien à comprendre ». Abragam (1989), p. 64. Au-delà de l'anecdote, cette réaction est tout à fait représentative de la manière avec laquelle l'œuvre de Destouches a été perçue chez un grand nombre de théoriciens de la génération d'après-guerre.



cachées<sup>553</sup>. Cependant, il dut ensuite reconnaître que, *de facto*, la théorie de Louis de Broglie-David Bohm existait bel et bien, et reproduisait à l'identique les prévisions de la mécanique quantique non-relativiste. Prenant donc acte de l'existence de ce genre de théories, Destouches essaie de les intégrer au sein de l'édifice métathéorique dont il essaie de dresser la carte depuis les années 1930. Nous voici revenus à la période de la discussion entre Louis de Broglie et le panel de physiciens et philosophes qui s'est tenue sous l'égide de la Société Française de philosophie en 1953. À la suite de l'échange entre Bauer et de Broglie, Destouches prend la parole et éclaire le débat entre les deux hommes. Il indique que la position de chacun des deux physiciens est parfaitement défendable. Destouches a précédemment montré qu'« on peut transformer toute théorie mise sous forme quantique orthodoxe habituelle en une théorie réaliste déterministe en droit, mais ceci à une condition : ajouter des paramètres qui sont inaccessibles à l'expérience<sup>554</sup>. » La question de savoir si une théorie telle que la mécanique quantique est complète ou non dépend alors du sens que l'on attribue au terme « réalité physique » à laquelle la mécanique quantique est censée se rapporter. Dans une perspective positiviste, la seule réalité que le physicien est en droit de se donner concerne ce qui est en principe accessible à l'expérience. Dans cette perspective, la mécanique quantique est « essentiellement incomplète ». On peut cependant adopter une lecture plus réaliste de la physique, en accordant au terme « réalité physique » une signification telle qu'elle se réfère « à une réalité qui existe indépendamment de nous, qui est là indépendamment de nos moyens d'expérience, et que nous découvrons peu à peu avec nos processus expérimentaux<sup>555</sup> ». Alors, une théorie réaliste dans ce sens est toujours possible, on peut toujours compléter une théorie comme la mécanique quantique de façon à ce qu'elle soit compatible avec le réalisme, mais à la condition qu'on ait introduit des paramètres inaccessibles à l'expérience, « paramètres tels que si on les supposait mesurables ou ayant été mesurés, il en résulterait une contradiction au sein de la théorie<sup>556</sup>. » Destouches complète son discours en indiquant que la réciproque est également vraie : il y a toujours la possibilité de passer d'une théorie à paramètres intrinsèquement inaccessibles à l'expérience à une théorie instrumentaliste du type de la mécanique quantique orthodoxe. Il conclut en indiquant que l'on se retrouve ainsi dans une situation dans laquelle « les conceptions physiques peuvent s'accorder avec la plupart des conceptions philosophiques ».

Destouches continuera à suivre de près les travaux ultérieurs de Louis de Broglie tout en ne partageant pas ses conceptions philosophiques. Refusant de croire en l'ontologie de la théorie de la double solution, il analysera cependant de près cette tentative en tant que spécimen représentatif d'une classe de théorie : « les théories fonctionnelles<sup>557</sup> ».

Destouches est sans doute le physicien français<sup>558</sup> qui a su dégager la meilleure clarification des difficultés conceptuelles et épistémologiques liées aux problèmes d'interprétation de la mécanique quantique. Le fait que son œuvre ait été dénigrée par les théoriciens de la génération d'après guerre est un phénomène sur lequel il nous faudra revenir.

## 5- Conversion

---

<sup>553</sup> Destouches (1953).

<sup>554</sup> De Broglie (1953-B), p. 484.

<sup>555</sup> *Ibid.* p. 484.

<sup>556</sup> *Ibid.* p. 485

<sup>557</sup> Par opposition aux « théories de la prévision » que représente la mécanique quantique orthodoxe.

<sup>558</sup> Avant, bien sûr, l'arrivée de physiciens comme Bernard d'Espagnat, Michel Paty ou Rolland Omnès.

C'est le cas le plus rare, et le seul exemple semble avoir été Louis de Broglie, du moins lors de sa période « orthodoxe », entre 1928 et 1951. Comme nous l'avons vu, de Broglie chercha dans un premier temps à donner une interprétation réaliste aux résultats de la mécanique quantique avec sa théorie de la double solution et de l'onde pilote. Les raisons de l'abandon de ces théories, à partir de 1929, peuvent être résumées en deux points, que j'expose brièvement :

-Le premier point, sans doute le plus décisif, correspond aux difficultés techniques inhérentes aux deux théories en question. Comme nous l'avons vu, la théorie de la double solution contenait des hypothèses mathématiques qui étaient difficilement justifiables. De même, la version simplifiée, la théorie de l'onde pilote, se heurtait à des objections qui étaient alors difficilement surmontables. La principale a été mise en évidence par Wolfgang Pauli, qui l'a présentée au Conseil Solvay peut-être de façon inutilement compliquée. De Broglie lui-même exposa cette difficulté lors de sa première année de cours à la Sorbonne en 1928 de manière plus simple et systématique<sup>559</sup>. Elle peut se résumer ainsi : le formalisme de la mécanique ondulatoire (dans sa version probabiliste) anticipe les valeurs possibles prises par les observables après une mesure. Celles-ci correspondent aux valeurs propres de l'opérateur auto-adjoint qui représente l'observable en question. A l'inverse, la théorie de l'onde pilote prescrit à chaque instant une valeur (la plupart du temps inconnue de nous mais existant cependant) à toute grandeur caractérisant le système physique. L'important ici est, qu'en règle générale, la valeur de la grandeur en question telle que définie par l'onde pilote ne semble pas correspondre à une des valeurs propres de l'opérateur auto-adjoint de la mécanique ondulatoire, sauf à de rares exceptions. En réalité, cette difficulté purement technique sera résolue par David Bohm en 1951 grâce à la prise en compte de l'acte de mesure. Il montrera effectivement que l'interaction entre l'appareil et le système « force » celui-ci à se trouver dans un des états correspondants à une valeur propre de l'observable mesurée<sup>560</sup>. En attendant, cette difficulté semblait rédhibitoire, et le théorème de Von Neumann de 1932 acheva de convaincre Louis de Broglie de l'inanité de sa théorie.

-Le second point, plus difficilement objectivable, relève de facteurs davantage sociologiques et psychologiques. Louis de Broglie a pu mesurer à quel point il était isolé dans ses tentatives lors du Conseil Solvay de 1927. Il ne reçut un soutien que très timide de la part d'Einstein, et sa présentation ne reçut que très peu de commentaires de la part des autres physiciens pourtant réticents vis-à-vis de l'interprétation entièrement probabiliste qui était présentée par les physiciens de Copenhague-Göttingen. En continuant ses tentatives, Louis de Broglie prenait le risque de se marginaliser complètement dans la communauté des théoriciens quantistes à une période où il ne faisait que débiter sa carrière scientifique. De Broglie reconnut lui-même également que son nouveau métier

---

<sup>559</sup> De Broglie (1930).

<sup>560</sup> Soit par exemple un électron possédant une fonction d'onde  $\psi(x) = Ae^{\frac{-i}{\hbar}S} = \sum_n c_n \varphi_n$  avec les  $\varphi_n$  définies par l'équation aux valeurs propres  $H\varphi_n = E_n\varphi_n$  et  $S$  correspondant à l'action hamiltonienne de la particule. Les  $E_n$  sont alors les valeurs possibles de l'énergie de l'électron après la mesure de cette grandeur, selon la version standard de la mécanique ondulatoire. La théorie de l'onde pilote, elle, utilise la première expression de la fonction d'onde pour définir l'énergie de la particule :  $E = \frac{\partial S}{\partial t}$ . En général,  $E$  qui dépend de la position qu'occupe la particule au sein de l'onde (ignorée de nous, mais cependant existant à chaque instant) est différent des  $E_n$ , d'où la difficulté. Cependant, dans certains cas particuliers,  $E$  peut correspondre à un des  $E_n$ . Bohm montrera, sans introduire d'hypothèse *ad hoc* mais en esquisant un modèle du processus de mesure quantique, que c'est le cas notamment après une mesure de l'énergie.

d'enseignant lui laissait moins le loisir de continuer sur cette voie, en raison du fait qu'il ne pouvait pas se permettre de présenter à ses étudiants des ébauches de théories<sup>561</sup>.

Le phénomène de conversion scientifique est un processus complexe qui ne se laisse sans doute pas décrire de manière unidimensionnelle. Cependant, sans nier que le second type de facteurs ait pu jouer un rôle important, il faudrait tout de même nuancer leur impact en indiquant qu'une analyse des écrits de Louis de Broglie pendant sa période intermédiaire tend à montrer que Louis de Broglie était intellectuellement convaincu par l'impossibilité de revenir à ses anciennes tentatives.

En tout état de cause, la situation était très différente sur ces deux points lorsqu'il reprit ses tentatives de développement de la double solution en 1951 : les travaux de Vigier et Bohm démontraient ou esquissaient des voies qui laissaient envisager la levée des obstacles techniques, Louis de Broglie n'était désormais plus isolé dans cette aventure intellectuelle, et sa carrière était suffisamment avancée pour prendre de tels risques.

## 6- À la recherche d'une alternative

Nous avons vu que, pour des raisons différentes, cette attitude a été épisodiquement adoptée pendant les premières années qui suivirent la création de la mécanique quantique, soit par souci de renouer avec une description plus intuitive des phénomènes physiques (Louis de Broglie et Jean Ullmo), soit pour des raisons essentiellement formelles (Alexandre Proca). Ces tentatives ont été toutes abandonnées par la suite, mais cette attitude a refait surface au tournant des années 1950. Les toutes premières tentatives qui renouent avec cette tendance sont issues davantage de l'ingénuité de jeunes physiciens n'ayant pas encore intégré de manière suffisante la mécanique quantique plutôt que d'une réflexion réellement mûre sur la nécessité de trouver une interprétation alternative<sup>562</sup>. Mais à partir des années 1950, des critiques envers « l'interprétation de Copenhague<sup>563</sup> », amorcées initialement par des physiciens et philosophes soviétiques pour des raisons essentiellement idéologico-politiques, commencent à se multiplier. Les principales sont l'œuvre des physiciens soviétiques Blokhinstev et Terletsky. Sympathisant marxiste<sup>564</sup>, David Bohm lira ses critiques et redécouvrira en 1951 la théorie de l'onde pilote dont nous avons parlée. Comme nous l'avons vu précédemment, la tentative de Bohm trouvera un écho favorable dans un premier temps chez Jean-Pierre Vigier, puis chez Louis de Broglie (après une période d'hésitation). Le charisme du premier et le prestige du second auront pour conséquence la formation d'un petit groupe de physiciens, essentiellement composé de sympathisants marxistes, qui se consacreront « au programme causal » qui prenait souvent l'allure d'une démarche consistant à rendre compatible la physique microscopique avec la vision du monde supposée se dégager du matérialisme dialectique. Ces travaux ouvriront un débat qui prendra

---

<sup>561</sup> Comme nous le verrons, les cours que Louis de Broglie dispensait à la Sorbonne étaient toujours étroitement liés à son travail de recherche, ce qui ne manquait pas de poser quelques problèmes pédagogiques.

<sup>562</sup> Voir les témoignages d'Assène Datzeff et de Jean Bass dans Collectif (1988).

<sup>563</sup> C'est à cette période que le terme commence à apparaître. C'est apparemment Heisenberg qui en a assuré la diffusion, notamment afin de proclamer l'unité d'une interprétation dégagée par les fondateurs de la théorie contre les attaques qu'elle commençait à subir. Mais ses adversaires se sont eux-mêmes réappropriés ce terme, qui avait pour eux l'avantage de désigner une cible unique contre laquelle diriger leurs critiques. L'emploi de ce terme cependant pose une difficulté, qui est celle de la question de l'unité des différentes interprétations qu'elle est censée désigner. C'est essentiellement pour cela que j'ai jusqu'à maintenant tenté d'éviter son emploi, à quelques exceptions près cependant pour éviter des lourdeurs et lorsqu'aucun contresens n'en découlait. Voir à ce sujet Camilleri (2009).

<sup>564</sup> Il dut quitter les États-Unis et rejoindre le Brésil pendant la période du McCarthysme. Voir Freire (2003).

une place assez conséquente dans les journaux marxistes des années 1950, notamment *La nouvelle critique* et la *Pensée*<sup>565</sup>. Jean Joyeux parlera ainsi en 1956 de « lutte idéologique en Physique ». La plupart des marxistes intervenant dans ce débat seront d'accord pour condamner les réflexions à tendance idéaliste qu'inspirent les résultats de la mécanique quantique à Niels Bohr et Heisenberg, mais tous ne condamneront pas leur position purement scientifique sur le refus d'envisager des théories à variables cachées. Parmi les communistes ne semblant pas adhérer au programme causal figure François Lurçat, qui se remémore n'avoir pas trouvé un grand intérêt à ce genre de développement :

« [...] ça ne sert à rien cette double solution, aussi tant est qu'elle existe. J'ai trouvé que ce n'était même pas la peine d'entreprendre des recherches approfondies pour savoir si ça marche. J'ai encore tendance encore aujourd'hui à penser, comme je le croyais à l'époque, que ça ne marche pas du tout, que cette double solution n'existe pas mathématiquement, mais qu'importe, je ne pourrai pas le prouver. On ne peut pas perdre du temps à prouver une théorie dont on pense que, de toute façon, elle ne sert rien et qui ne mord pas sur l'expérience<sup>566</sup>. »

Cependant Lurçat indique avoir été très impliqué dans la défense du matérialisme dialectique :

« Moi j'y croyais dur comme fer, et je pensais que c'était vraiment la solution des problèmes philosophiques puisque d'une part il fallait être matérialiste et d'autre part il ne fallait pas être mécaniste, il fallait être dialectique<sup>567</sup>. »

Enfin, Lurçat se rappelle qu'un certain nombre de physiciens communistes (parmi lesquels Philippe Meyer, Eugène Cotton, ou Pierre Charles) qui ont participé épisodiquement au débat<sup>568</sup> le faisaient avant tout sur les recommandations du *PCF*, sans toutefois s'intéresser vraiment à la controverse. Quoi qu'il en soit, une poignée de physiciens Marxistes ont adhéré avec force et conviction au programme causal : outre Jean-Pierre Vigier, ils se nomment Francis Halbwachs, Francis Fer, Gérard Vassails ou encore Evry Schatzman, ou Georges Lochak, avec en ligne de mire « l'empiriocriticisme » de Heisenberg et Niels Bohr, accusés d'avoir « rompu, depuis 1927 » avec « la méthode scientifique<sup>569</sup> ».

Le débat entre ces communistes et les défenseurs de « l'interprétation de Copenhague » n'était pas dépourvu d'une forte dose de polémique, due essentiellement aux personnalités de Jean-Pierre Vigier ou d'Evry Schatzman. Le caractère idéologico-politique de ces travaux va s'estomper dans les années qui suivent et le débat deviendra alors essentiellement technique et épistémologique. Cependant, qu'elle prenne ou non une coloration polémique, politique ou idéologique, la principale motivation, le principal moteur de la recherche de ce genre d'alternative semble avoir été l'attachement à une version du réalisme physique. Dans ce cadre, l'argument de « la perturbation incontrôlable du système par l'appareil de mesure » ne saurait servir d'échappatoire : « même si la mesure perturbe le système, il convient de prendre en compte cette perturbation pour remonter aux lois

---

<sup>565</sup> Voir à ce sujet Cross (1991).

<sup>566</sup> Lurçat (2011).

<sup>567</sup> *Ibid.*

<sup>568</sup> Les deux derniers ont, en compagnie de François Lurçat, édité un petit cahier regroupant différents textes soviétiques portant sur l'interprétation de la mécanique quantique. (Charles, Cotton, Lurçat (1957).)

<sup>569</sup> Vassails (1953).

auxquelles obéit le système indépendamment de la mesure<sup>570</sup> ». En somme, ces tentatives ont pour objectif de se positionner par rapport à une question qu'énonce Jean-Pierre Vigier en 1957 lors d'un débat qui l'oppose à Léon Rosenfeld : « est-ce que les énoncés scientifiques ont un sens en dehors des observateurs ? ». Pour Jean-Pierre Vigier, la réponse à cette question ne peut être énoncée sur une base logique : seule la pratique permet de trancher. Or, remarque Vigier, la pratique scientifique habituelle admet implicitement la réponse, et celle-ci est positive :

« Il existe la science de la géologie qui nous renseigne sur des périodes durant lesquelles aucun observateur n'était présent. Et je crois que même durant les périodes des gros Sauriens les lois de la mécanique quantique s'appliquaient pour les molécules à l'intérieur de ces animaux même si je ne peux pas aller le vérifier car, malheureusement, ils ont disparu. Aussi, l'idée même d'une description de l'univers sur la base de lois et de faits que nous observons maintenant est un édifice scientifique valide.<sup>571</sup> »

En conséquence, le fait que la microphysique actuelle se restreigne à ne parler que de ce qui est observable est pour Vigier une rupture majeur dans le développement des sciences et contre laquelle il s'inscrit en faux.

## 7- Conclusion

Les modalités de réception de la mécanique quantique, qu'elles se situent sur le plan philosophique, épistémologique ou purement scientifique, sont relativement variées chez les physiciens que nous avons étudiés. Nous pouvons cependant avec une certaine confiance émettre la conjecture que les étrangetés physiques et philosophiques que semblent impliquer ce cadre théorique n'ont pas constitué en tant que telles un obstacle à la diffusion de la théorie en France. Il ne semble effectivement pas y avoir de corrélations chez ces physiciens entre un refus ou une acceptation épistémologique de la théorie et une intégration dans leur pratique professionnelle effective. Paul Langevin et Edmond Bauer, qui ont sans doute été les physiciens les plus intéressés et les plus enthousiasmés par les aspects philosophiques de la mécanique quantique, n'en ont fait qu'un usage modéré dans leurs travaux<sup>572</sup>. Jean Ullmo et Louis de Broglie, qui ont sans doute été les physiciens les plus choqués et les plus réticents à accepter, pour des raisons philosophiques, la mécanique quantique, en ont quant à eux systématiquement fait usage. La « politique de l'autruche », telle que décrite par Einstein, n'a semble-t-il pas été pratiquée en France. Enfin, les physiciens qui se sont montrés relativement indifférents vis-à-vis de ces sujets ont pu la pratiquer massivement (c'est le cas de Petiau ou Proca) ou pas du tout (Rocard, Néel). Pour ces physiciens, j'é mets la conjecture, qui me semble très largement renforcée par les études de cas que nous venons de faire, que les modalités qui président à l'assimilation ou non d'une théorie n'est pas la vision du monde qui découle de celle-ci, mais plutôt le type d'opérations formelles que sa prise en main nécessite, ainsi que les thèmes qu'elle permet d'aborder avec le maximum d'efficacité. À cet égard, les problèmes d'interprétation de la mécanique

---

<sup>570</sup> Vassails (1953).

<sup>571</sup> Korner (1957), p. 184.

<sup>572</sup> Ces deux physiciens l'ont bien sûr enseignée, et Bauer a même écrit un livre sur la théorie des groupes appliquée à la mécanique quantique, mais on ne retrouve que très rarement l'utilisation de cette théorie dans ses travaux de recherches qu'il publie notamment dans *Journal de Physique et le Radium*.

quantique ne semblent avoir eu un impact très réduit sur la production de ce que nous avons appelé « physiciens formalistes » et « physiciens à problème ».

Cependant, les problèmes d'interprétation ont tout de même eu un impact évident sur la *nature* des travaux d'un certain nombre de physiciens français. La situation épistémologique particulière dans laquelle l'apparition de la mécanique quantique a placé la physique est au moins autant responsable, si ce n'est plus, que les difficultés purement scientifiques et techniques auxquelles elle était confrontée<sup>573</sup> dans la décision de Jean-Louis Destouches de prendre du recul par rapport à toute application concrète du formalisme. De la même manière, c'est la prise de conscience que l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique était difficilement compatible avec certains présupposés philosophiques généralement admis par le réalisme qui a poussé une poignée de physiciens regroupés autour de Louis de Broglie et Jean-Pierre Vigier, à chercher une formulation alternative à la mécanique quantique traditionnelle. Les problèmes techniques de son application à la physique nucléaire n'ont été, me semble-t-il, qu'un prétexte à la recherche d'une théorie plus satisfaisante philosophiquement.

Dernier point qui ressort de cette étude, l'« interprétation de Copenhague » ne semble pas avoir été massivement rejetée par les physiciens français des années 1930 et 1940, pour la simple raison que celle-ci n'a jamais été formalisée de manière unifiée et précise. Ce dont les physiciens (ou les philosophes) discutent durant cette période, ce sont « des réflexions profondes de MM. Bohr et Heisenberg<sup>574</sup> ». Or, même les idées de ces deux auteurs ne sont pas acceptées ou rejetées d'un seul bloc. La plupart des physiciens sont par exemple séduits par l'idée de ce que Heisenberg nommera « la fin de la coupure cartésienne », c'est-à-dire l'idée selon laquelle la séparation entre le monde extérieur et l'observateur ne peut plus être poursuivie en microphysique, et qu'il faut donc accepter toutes les conséquences qui doivent être tirées du fait que l'être humain n'est pas un spectateur, mais un acteur dans le monde. Mais ceci fut essentiellement fait en conservant la « méta-image » de la perturbation incontrôlable du système par l'appareil de mesure, qui a été suggérée par les écrits mêmes des deux fondateurs de ce qui sera a posteriori appelé « l'interprétation de Copenhague ». Ils sont également, pour beaucoup d'entre eux, prêts à accepter que les notions d'onde et de corpuscule, notions construites par abstractions successives de notre expérience du monde macroscopique<sup>575</sup>, ne peuvent pas prétendre sans discussion permettre de décrire l'ontologie microscopique. En revanche, certaines phrases écrites ou dites par des auteurs que l'on considère comme faisant partie de ce courant de pensée ont été très sévèrement critiquées par les physiciens français. C'est le cas de phrases telles que : « la nature fait un choix » (Dirac) ou « l'observateur fait un choix » (Heisenberg, en réponse à Dirac), soit en général toutes les phrases qui tendent à attribuer de manière trop explicite des caractères anthropomorphes à la matière ou encore à exprimer une vision trop spiritualiste du rôle de l'observateur dans le processus de mesure quantique. Enfin, le débat sur le déterminisme a pris un aspect moins rude par la mise en place de certaines stratégies visant d'une part à légitimer le fait que l'être humain ne peut de toute façon pas tout prévoir, et d'autre part à donner un caractère moins mystique, moins irrationnel à l'indétermination quantique (par la mention, une nouvelle fois, de la perturbation entre le système et l'appareillage). Souvent, le retranchement derrière certaines formes de positivisme a été le moyen le plus facile d'éviter de prendre des positions très clairement irrationalistes et acausalistes.

---

<sup>573</sup> Problème des infinis en seconde quantification.

<sup>574</sup> Type de phrases souvent employées par les physiciens français lorsqu'ils font références à ces deux auteurs.

<sup>575</sup> Voir par exemple Langevin (1933).



Nous terminerons en remarquant que les problèmes conceptuels les plus graves n'ont souvent pas été clarifiés par les physiciens avant les années 1950 et 1960, période à partir de laquelle les problèmes de fondement de la mécanique quantique ont été l'objet d'un nombre de travaux considérable. On peut très certainement penser que cette période de flottement a permis un atténuation dans la radicalité des prises de position de chacun vis-à-vis de ces problèmes.

### III- Quel rôle a joué Louis de Broglie ?

Les parties précédentes ont permis d'établir la façon dont les physiciens français se sont appropriés la mécanique quantique, tant du point de vue de leur pratique scientifique que de leur manière de la comprendre et des implications épistémologiques et philosophiques qu'ils en ont tirées. Nous nous intéresserons ici plus particulièrement au rôle que Louis de Broglie a pu jouer dans ce processus. Nous ferons cette analyse essentiellement sur trois plans. D'une part, nous chercherons à comprendre dans quelle mesure son œuvre scientifique a influencé la recherche de ses collègues physiciens français (les parties qui précèdent nous ont, à cet égard, préparé le terrain dans une large mesure). D'autre part, nous chercherons à dégager son rôle institutionnel (dans quelle mesure Louis de Broglie a orienté la recherche française à travers son influence sur la nomination des théoriciens à différents postes et donc sur l'enseignement dans le supérieur). Enfin, nous nous arrêterons brièvement sur une autre modalité de la réception d'une théorie qui est la suscitation de l'intérêt vis-à-vis d'elle. Nous verrons que Louis de Broglie a pu jouer, à travers son œuvre de vulgarisation scientifique, un rôle non négligeable dans la vocation pour la physique d'un bon nombre de physiciens français.

#### 1- Le rôle scientifique de Louis de Broglie

De la publication de la thèse de Louis de Broglie à l'apparition d'un noyau solide de physiciens théoriciens en France s'écoulent environ cinq années, durant lesquelles l'œuvre de ce savant n'a pu avoir qu'un impact mineur. Les résultats de cette thèse n'ont en outre suscité l'intérêt d'un certain nombre d'expérimentateurs français pour la diffraction électronique qu'après que le phénomène ait été mis en évidence à l'étranger. Et si, pendant longtemps, on a pu parler en France de la « mécanique ondulatoire de Louis de Broglie » — à en croire Jean Ullmo, « le prix Nobel [de 1929 attribué à Louis de Broglie] a absolument changé la perspective de l'enseignement officiel français », et « la Mécanique est devenue [à partir de ce moment là] respectable<sup>576</sup> » — c'est cependant essentiellement sous la forme que lui a donnée Schrödinger qu'elle va s'introduire lentement dans la production des physiciens français. Enfin, comme nous l'avons vu précédemment, si Louis de Broglie commence à enseigner à cette période, il traverse au niveau de la recherche une période creuse due à l'abandon de sa théorie de la double solution.

C'est donc seulement à partir des années 1930, et notamment à partir de la création du séminaire de recherche à l'Institut Henri Poincaré en 1932 que Louis de Broglie a réellement pu influencer sur le type de théorie qui était pratiqué en France. Dans un premier temps, cette influence se fait surtout par la recommandation donnée à des jeunes théoriciens d'orienter leurs travaux de thèses

---

<sup>576</sup> Ullmo (1963).

sur certains sujets spécifiques. Il est difficile de documenter la question de savoir dans quelle mesure Louis de Broglie a supervisé de manière directive les travaux de plus jeunes chercheurs. Il semblerait que cette question devrait être posée au cas par cas, mais que d'une manière générale, Louis de Broglie a été assez permissif vis-à-vis du choix de ses élèves. Proca semble avoir été orienté sur l'étude de l'équation de Dirac par Louis de Broglie<sup>577</sup>, sujet qui était en effet à l'époque au cœur des préoccupations de ce dernier. Cependant, l'aspect formel et abstrait de l'approche de Proca par rapport à ce problème n'est sans doute pas une marque de la main mise de Louis de Broglie sur ce travail. De la même manière, il est tout à fait possible que certaines recommandations de Louis de Broglie aient pu orienter Jean-Louis Destouches vers le sujet de la « super-quantification ». D'une manière générale, étant donné le peu de théoriciens qualifiés pour diriger les recherches à cette période, il est évident que ce que Louis de Broglie avait identifié comme des sujets dignes d'intérêts n'a pu avoir qu'une grande influence sur les jeunes chercheurs qui n'étaient pas encore suffisamment mûrs pour pouvoir apprécier ce genre de données par eux-mêmes. Le témoignage de Jean-Louis Destouches atteste de ce rôle de centre diffuseur des théories quantiques qu'a joué Louis de Broglie et son séminaire dans les années 1930 :

« [...] nous étions au début seulement trois [André George, Claude Magnan et Destouches lui-même] groupés autour d'un maître de trente-neuf ans, qui, encore dans le feu de ses premières découvertes, avait le temps de nous les expliquer lui-même, et de nous détailler, livre en main, tel mémoire récent, aujourd'hui devenu un classique de la physique quantique. C'est ainsi que je fus initié directement à la théorie de la superquantification qui devait me conduire aux idées exposées dans ma thèse de physique. Chaque année, les cours de Louis de Broglie, le lundi et le jeudi de très bonne heure tout comme aujourd'hui, voyaient arriver de nouveaux élèves à côté des anciens, toujours désireux de se tenir au courant des derniers développements des théories brogliennes : Mme Tonnelat-Beaudot, Cartan, Datzeff, Dubarle, Géhenniau, George, Goldstein, Kwal, Solomon, Wanatabé, Winter, etc.<sup>578</sup> »

Reste que si Louis de Broglie a eu ce rôle de diffuseur de l'information, de nombreux indices laissent penser qu'il n'a eu aucune réelle volonté de coordonner la recherche autour de lui sur des sujets très précis. Le premier indice est la disparité des travaux effectués autour de lui. Par exemple, bien qu'ayant de nombreux échanges scientifiques avec « le maître », Goldstein, Kwal et Winter travaillent durant les années 1930 sur des sujets qui ne semblent pas être au cœur des préoccupations de celui-ci. De la même manière, bien que reconnaissant la bienveillance dont faisait preuve Louis de Broglie à son égard, Datzeff<sup>579</sup> raconte qu'il allait trouver ce dernier pour lui présenter des travaux dont il n'approuvait pas forcément l'orientation. Plus généralement, les physiciens qui ont eu Louis de Broglie comme directeur de thèse et dont il reste un témoignage se rejoignent sur le fait de la distance très courtoise qu'il prenait par rapport aux travaux de ses élèves<sup>580</sup>.

En particulier, les travaux très abstraits de Jean-Louis Destouches, bien que suscitant l'admiration et l'intérêt de Louis de Broglie, n'étaient certainement pas commandés par ce dernier. Une anecdote, racontée par Anatole Abragam, illustre le fait que Louis de Broglie n'était sans doute pas directement responsable des travaux les plus abstraits qui se menaient autour de lui :

---

<sup>577</sup> Proca (1988), introduction.

<sup>578</sup> Destouches (1953), p. 69

<sup>579</sup> Datzeff (1988).

<sup>580</sup> Par exemple d'Espagnat (Witkowski (1997), ou encore Cécile Morette-Dewitt (2011).

« Je me souviens de la visite de candidature à l'Académie des sciences que je fis à de Broglie en 1972. Dans ma notice de titres et travaux, j'avais écrit : « Je n'avais pas les qualités nécessaires pour apprécier les travaux très abstraits poursuivis autour de M. Louis de Broglie » « C'est vrai, me dit-il, que tout le monde autour de moi ne faisait que des choses abstraites ; personnellement, je suis plutôt porté vers le concret »<sup>581</sup> ».

Un autre témoignage, dû cette fois à un élève de Louis de Broglie, Georges Lochak, tend également à accréditer cette vision des choses :

« Il considérait du reste qu'il y avait eu une erreur dans la constitution de l'Institut Henri Poincaré : celle de rapprocher les théoriciens des mathématiciens et non pas des expérimentateurs. [...] Il souhaitait vivement que la Fondation [Louis de Broglie, créée en 1973, et dont Lochak est l'actuel président] soit aussi proche que possible de l'expérience. [...] Quand Robert Courier [...] et Olivier Moreau-Néret [...] lui firent demander, par mon entremise, qui il voulait nommer à la Présidence et à la Vice-Présidence, il m'a aussitôt répondu : « Louis Néel et André Lallemant. Ce sont de grands expérimentateurs, proches des applications. Ils aideront la Fondation à rester les pieds sur terre »<sup>582</sup>. »

L'image d'un Louis de Broglie vivant exclusivement dans un monde théorique éthéré est largement mise en question par la biographie que Lochak lui consacre, et dans laquelle il fait notamment ressortir son intérêt pour les travaux expérimentaux et même pour l'ingénierie. Ses archives déposées à l'Académie des sciences de Paris confirment l'étendue des centres d'intérêts du savant, notamment envers ce genre de sujets. On peut d'ailleurs assez facilement en comprendre l'origine. Les premiers travaux de Louis de Broglie dans le laboratoire de son frère l'ont exposé à une façon de pratiquer la théorie en étroite collaboration avec des expérimentateurs. Son travail à la tour Eiffel durant la première guerre mondiale l'a mis en contact avec une activité de type plus manuel. Enfin, sa paternité de l'hypothèse de la nature ondulatoire de l'électron l'a sans doute incité à suivre de près les travaux expérimentaux menés dans ce champ de recherche. Ce n'est donc certainement pas par goût personnel ou par choix conscient de Louis de Broglie que l'Institut Henri Poincaré a été le centre de développement d'une physique théorique très abstraite.

Tout ce qui vient d'être dit ne doit cependant pas être mal interprété. D'une part, si son intérêt pour les applications est sincère, cela ne veut pas dire qu'il considère que cela soit son domaine de compétence. D'autre part, il est vrai que son intérêt pour l'expérience joue, dans son esprit, une fonction épistémologique régulatrice qui consiste à ne jamais oublier qu'à un moment ou un autre, c'est finalement l'expérience qui tranchera. Mais ce moment de confrontation avec l'expérience n'est pas nécessairement fixé et peut donc quelquefois intervenir à un stade de développement très avancé de la théorie. Plus important encore, les données de l'expérience ne jouent pas, chez Louis de Broglie, un rôle constructif dans l'élaboration de la théorie, mis-à-part peut être lorsqu'elles sont digérées au sein de théories déjà bien établies.

En retour, les théories qu'il produit n'ont que très rarement un intérêt immédiat pour les expérimentateurs (à l'exception de la découverte de son onde). Dans les faits, ses propres travaux ont suscité davantage l'intérêt de physiciens théoriciens français portés vers l'abstraction plutôt que de théoriciens plus proches de l'expérience, voire même des expérimentateurs. Une analyse des références bibliographiques dans les articles quantiques du *Journal de Physique* durant la période

---

<sup>581</sup> Abragam (1989), p. 66.

<sup>582</sup> Collectif (1988), p. xxix-xxx.

1925-1940 permet d'illustrer ces faits. De Broglie est l'auteur le plus cité (30 citations) dans ce type d'articles théoriques (ce qui illustre son importance scientifique), loin devant des personnalités comme Léon Brillouin, Heisenberg (16 citations chacun), Peierls, Dirac ou Bethe (15 citations) qui le suivent directement dans ce classement. Pourtant, lorsque l'on regarde comment se répartissent ces citations, on s'aperçoit qu'il est très peu cité par les physiciens les plus internationalistes et les plus aux prises avec une mécanique quantique appliquée. Brillouin et Goldstein, malgré la richesse de leur bibliographie et leur nombre d'articles, ne le citent respectivement qu'à une et deux reprises ; même remarque pour Solomon et Elsasser qui ne le citent jamais ; l'exception ici est Winter, qui pratique une physique quantique plutôt appliquée, mais qui cite néanmoins Louis de Broglie à six reprises. Pour ce dernier cas, il faut cependant indiquer qu'un livre est principalement cité : le livre de Louis de Broglie sur l'électron de Dirac de 1934<sup>583</sup>, qui est le premier livre français traitant systématiquement de cette théorie. On peut préciser les choses en regardant de plus près les théoriciens qui ont effectivement été inspirés par les travaux de Louis de Broglie dans leurs propres recherches. Comme ce dernier le soulignait dans les années 1950, « [ses] travaux sur la théorie du photon et celle plus générale des particules à spin ont orienté les recherches de plusieurs de [ses] jeunes collaborateurs<sup>584</sup> ». C'est le cas notamment comme nous l'avons vu de Gérard Petiau et de Marie-Antoinette Tonnelat, dans une moindre mesure également de Jean-Louis Destouches. Mais d'autres physiciens étrangers ont également publié sur cette théorie dans le *Journal de Physique*. On peut également signaler que, bien que cela soit d'une façon plus indirecte, la théorie neutrinienne de la lumière a également été discutée par Alexandre Proca dans certains de ses articles.

Une des conséquences sur le contexte francophone de la large influence des idées de de Broglie sur les théories quantiques relativistes des particules élémentaires est sans doute le manque de considération pour les développements autour de la théorie quantique des champs. Nous l'avons vu, le seul physicien à avoir suivi cette voie théorique, Jacques Solomon, est aussi le seul physicien qui n'a pratiquement subi aucune influence « broglienne<sup>585</sup> ». Jean-Louis Destouches a certes fait sa thèse sur la seconde quantification, mais nous avons déjà insisté sur la différence qui existait, dans l'esprit de Louis de Broglie, entre cette méthode et la théorie quantique des champs. Nous avons déjà beaucoup insisté sur ce point et nous ne nous y éterniserons pas.

Une autre conséquence est que les physiciens français se sont très peu intéressés à d'autres domaines d'applications de la théorie quantique. En particulier, les physiciens qui se sont intéressés à des sujets comme la physique nucléaire, la physique du solide ou la physique atomique et moléculaire le faisaient largement en périphérie des travaux de recherche qui se déroulaient à l'Institut Henri Poincaré ou au Séminaire de Broglie, même lorsqu'ils sont institutionnellement rattachés à l'IHP (c'est notamment le cas pour les travaux en physique nucléaire d'Elsasser ou de Solomon et pour les travaux de Léon Brillouin en physique du solide). Il n'y avait pourtant aucune volonté affichée d'ostraciser ce genre de physique théorique, puisque dans un rapport sur les activités du centre de recherche de physique théorique de l'Institut Henri Poincaré en 1944, Louis de Broglie indique : « Le centre de Physique théorique [...] s'intéresse également aux applications de la Mécanique ondulatoire »<sup>586</sup>. Louis de Broglie cite ainsi trois exemples : E. Maurice Cotte qui a effectué une thèse

---

<sup>583</sup> De Broglie (1934).

<sup>584</sup> Archives de l'Académie des sciences. (42J/boîte 40), de Broglie (1944-A).

<sup>585</sup> Contrairement à Proca ou Goldstein, qui, même s'ils ne peuvent pas vraiment être considérés comme des élèves de Louis de Broglie, ont cependant quelques rapports intellectuels avec lui.

<sup>586</sup> Archives de l'Académie des sciences. (42J/boîte 40), de Broglie (1944-A).

sur l'optique électronique, Claude Magnan et ses collaborateurs du laboratoire de Physique du Collège de France, qui « étudient des problèmes théoriques d'optique électronique en liaison avec l'Institut Henri Poincaré », et enfin Raymond Daudel, « qui travaille à l'institut du Radium et a fait de très intéressants travaux sur la chimie des radioéléments artificiels, [et qui] fait depuis deux ou trois ans de grands efforts pour développer chez nous les applications de la Mécanique ondulatoire à la Chimie et pour tourner vers ses problèmes l'attention des jeunes chercheurs ». Cependant, ces trois cas sont des exceptions qui confirment la règle : aucun des trois n'étant rattaché institutionnellement à l'Institut Henri Poincaré, leur mention ne signale ici que l'existence d'échanges scientifiques bienveillants entre Louis de Broglie et eux. À mentionner également que Louis de Broglie tentera lui-même une ouverture vers la physique nucléaire pendant les années 1940, mais comme il l'indique lui-même, l'accent sera davantage mis sur la description fondamentale des interactions nucléaires, par exemple par la théorie des mésons, que sur des approches plus pragmatiques de modélisation de la structure du noyau (par exemple du type du modèle de la goutte liquide de Bohr).

Finalement, comme l'indiquera Jean-Pierre Joyeux en 1956, « l'école théorique française groupée autour de L. de Broglie est caractérisée par une forte préférence pour les côtés formels et mathématiques dans l'étude des théories physiques. L'Institut Henri Poincaré travaille depuis longtemps sans liaison avec l'expérience et même nourrit un certain mépris pour elle (**il y a là, non une attitude voulue et consciente, mais une pratique de fait**<sup>587</sup>). »

## 2- Le rôle institutionnel de Louis de Broglie

Comme nous l'avons vu au chapitre 2, la fin des années 1920 marque l'ascension institutionnelle de Louis de Broglie, ascension qui se poursuivra tout au long de sa carrière et qui culminera en 1942 avec son élection comme secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences. Sa présence dans de nombreuses commissions stratégiques sur l'administration de la science française fait de lui une des personnes incontournables du paysage scientifique du pays. Dans le contexte des années 1930 et 1940, Louis de Broglie demeure le seul théoricien<sup>588</sup> dont le pouvoir institutionnel est assez grand pour être en capacité d'infléchir la situation de la physique théorique. Louis de Broglie semble cependant avoir très peu réussi à le faire, et il faudra attendre les années 1950 et les initiatives de personnalités individuelles (Proca, Messiah, Lévy, Morette) combinées avec un volontarisme politique plus fort envers la recherche (développement du nucléaire, CNRS, Colloque de Caen de 1954)<sup>589</sup> pour que la physique théorique commence véritablement à se développer.

En réalité, nous pouvons supposer qu'un certain nombre de conditions n'étaient pas en place pour que la physique théorique puisse réellement se développer avant cette dernière période, notamment justement les moyens accordés à la recherche et le faible nombre de postes créés qui rendait, pour un jeune étudiant désireux de faire de la recherche, la perspective de persévérer dans la physique théorique assez décourageante. Jean Ullmo témoigne très bien de cet aspect dans son entretien avec Kuhn. Les carrières de Solomon, Proca ou Petiau dans les années 1930 témoignent également de la difficulté pour ces jeunes théoriciens de bénéficier d'une situation stable. Une longue période à vivre d'allocations boursières assez aléatoires était le passage obligé pour espérer se

<sup>587</sup> Jean-Pierre Joyeux, « À propos de la lutte idéologique en Physique », in *La nouvelle critique*, 76, 1956. p. 103. Souligné par moi.

<sup>588</sup> La nomination de Léon Brillouin au Collège de France lui fait peut-être perdre du poids institutionnel.

<sup>589</sup> Nous reviendrons plus tard sur tous ces aspects.

maintenir durablement en physique théorique. Il est clair que nous ne pouvons pas tenir rigueur à un professeur fraîchement nommé (Louis de Broglie n'est nommé à sa chaire qu'en 1933) d'avoir été dans l'incapacité de combler ces lacunes. D'un autre côté, les nombreux exemples de réussites d'entrepreneuries scientifiques d'après-guerre (Néel, Rocard, Joliot et, à une beaucoup plus petite échelle, Cécile Morette et son université des Houches), et même d'avant-guerre (Pasteur, Curie, Perrin, Borel avec l'IHP), montrent que des initiatives individuelles consistant à s'appuyer sur la volonté de certains hommes politiques, certaines fondations privées ou certains groupes industriels<sup>590</sup> peuvent permettre de peser sur ce genre de situations.

Un autre aspect de l'action d'un leader d'un champ scientifique consiste, en s'appuyant sur les forces en présence disponibles, à orienter la recherche en privilégiant institutionnellement certains chercheurs au détriment d'autres, en insérant son groupe de chercheurs à travers des réseaux scientifiques (échanges d'étudiants avec l'étranger, participation à des colloques, invitation de professeurs, etc.). En résumé, deux modalités d'actions peuvent être ici jugées : une action entrepreneuriale visant à défendre, consolider et étendre un territoire scientifique, et une action visant à le piloter.

#### a) Le développement de la physique théorique

Pour ce premier point, il semble que l'action de Louis de Broglie ait été assez modeste. Il semble de manière générale que Louis de Broglie n'a jamais été à l'initiative des entreprises auxquelles il a participé, mais qu'il a plutôt joué un rôle de caution que sa stature lui permettait lorsqu'il jugeait la cause défendue juste. On peut voir ce rôle mis en perspective dès la création de son séminaire en 1932. Ce séminaire fut, comme l'indique Lochak, le plus grand séminaire de physique de Paris :

« Le « séminaire IHP » a été, pendant des décennies, la pépinière des théoriciens français qui venaient s'y instruire et se tenir au courant des recherches qui se poursuivaient dans le monde ; tous les travaux théoriques qui se faisaient à Paris y étaient exposés. [...] Des dizaines de thèses en sortirent<sup>591</sup> ».

Il n'est pas contestable que ce séminaire joua un rôle décisif dans le développement de la physique théorique française au cours des années 1930 et 1940 notamment, avant que d'autres centres de discussions ne paraissent. Débutant au début des années 1930 autour d'un noyau composé de trois élèves, ce séminaire grandit progressivement pour atteindre une taille d'une cinquantaine de participants réguliers au cours des années 1950. Pour cela et pour d'autres raisons que nous allons étudier, il n'est guère contestable que de Broglie a pleinement contribué au rayonnement de la physique théorique française. Mais, ainsi que semble l'indiquer le témoignage de Jean-Louis Destouches sur l'origine de ce séminaire, Louis de Broglie a davantage été un accompagnateur autour duquel se condensaient les différentes initiatives qu'un réel acteur impulsant par lui-même les démarches. Destouches<sup>592</sup> indique en effet avoir lui-même poussé Louis de Broglie à organiser le séminaire, qui regroupait lors de la première année Claude Magnan, André George et lui-même.

---

<sup>590</sup> Ce dernier type d'initiatives est sans doute cependant plus délicat à mettre en œuvre en ce qui concerne la physique théorique, surtout à une période et dans un pays où le fait que la physique théorique puisse avoir une quelconque application industrielle était loin d'être évident.

<sup>591</sup> Lochak (1992), p. 160.

<sup>592</sup> Destouches (1953).



Toujours à propos du séminaire, une autre anecdote racontée par Georges Lochak pourrait également être assez révélatrice de la manière dont Louis de Broglie subissait plus qu'il n'endossait son rôle de patron, patron de cette communauté théorique française en général, et de son propre séminaire en particulier. En 1962, Louis de Broglie prend sa retraite de son poste de professeur de théories physiques à l'IHP<sup>593</sup> et abandonne ainsi son séminaire. Reformant cependant un nouveau séminaire dans les locaux de l'Académie des sciences, en compagnie d'une poignée d'élèves seulement (parmi lesquelles Georges Lochak), il semble accueillir avec un certain soulagement cette liberté retrouvée : « Enfin !... Maintenant que je ne suis plus leur chef et que je ne suis pas obligé de les suivre, nous allons pouvoir travailler tranquillement.<sup>594</sup> »

Louis de Broglie n'a sans doute pas non plus agit activement auprès des décideurs de l'enseignement supérieur pour que de nouveaux moyens soient fournis à la physique théorique. Une tentative d'agir en faveur de celle-ci peut se trouver dans les archives d'Alexandre Proca, dans une pétition cosignée par J. Perrin, E. Borel, L. de Broglie, Ch. Maurain, M. Brillouin, L. Brillouin, E. Picard et E. Le Roy. Cette lettre semble avoir cependant été préparée par Alexandre Proca, comme le laisse supposer les notes manuscrites y étant ajoutées<sup>595</sup>. La date de cette lettre n'est malheureusement pas indiquée, mais nous pouvons la situer cependant au cours des années 1930<sup>596</sup>. Le destinataire est Jacques Cavalier, alors Directeur de l'enseignement supérieur. Cette lettre laisse supposer que du moins dans certains milieux, la conscience de la situation de la physique théorique française était présente. Pour cette raison, je me permets d'en citer la quasi-totalité :

« La physique théorique a pris, depuis une dizaine d'années, une extension extraordinaire ; par ses conséquences cosmogoniques la théorie de la relativité a soulevé un intérêt passionné dans le monde savant ; la théorie quantique nous a donné la clef du monde atomique ; elle a permis d'interpréter une masse énorme de faits expérimentaux et provoqué un très grand nombre de découvertes importantes. De très nombreux problèmes restent à résoudre ; il importe que les jeunes générations d'étudiants soient préparées à ces recherches et puissent y apporter une contribution sérieuse.

Comparons ce qui se fait à ce sujet en France et à l'étranger. On peut admettre que, dans l'enseignement supérieur, et dans les publications scientifiques à l'étranger le rapport entre la physique théorique et la physique expérimentale est à peu près de un à deux : une chaire théorique pour deux expérimentales, un mémoire théorique pour deux expérimentaux.

En Allemagne, la proportion est certainement plus élevée en faveur de la théorie. En Angleterre, au Danemark, en Hollande la proportion de 1 à 2 est à peu près remplie. [...]

Qu'avons-nous en France ? Il y a eu de tout temps un centre très vivant à Paris, et la création de l'Institut Henri Poincaré a donné un foyer permanent à la physique théorique. De nombreux jeunes gens y viennent suivre les cours réguliers et les conférences de savants étrangers ; beaucoup **hésitent à se lancer dans une carrière qu'ils estiment sans issues**<sup>597</sup>. En effet, il y a à Paris quelques chaires de

<sup>593</sup> Il restera cependant secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences jusqu'en 1970.

<sup>594</sup> Lochak (1992), p. 231.

<sup>595</sup> Nous ne pouvons pas être affirmatifs, mais du moins il semble que Proca y ait participé. Sans doute le nom de Proca n'avait-il pas alors assez de poids pour que l'on ait jugé opportun de rajouter son nom à la liste des signataires, exclusivement composée de professeurs.

<sup>596</sup> Le modèle de lettre est pré-rempli par 193\_. Le contexte et le contenu de la lettre, le fait notamment qu'il soit spécifié que « la physique théorique a pris, depuis une dizaine d'années, une extension extraordinaire » et qu'« on peut compter actuellement 4 jeunes docteurs en physique théorique et 4 autres dont les thèses seront bientôt finies » suggèrent la date de 1933 ou 1934. De fait, les quatre premiers docteurs de cette génération que sont Solomon, Proca, Destouches et Goldstein soutiennent leur thèse en 1933 ou avant, et le suivant, Winter, la soutient en 1934.

<sup>597</sup> Souligné par les auteurs.

physique théorique, à la Sorbonne et au Collège de France. Mais en province, **il n'y a rien**, sauf une maîtrise de conférences à Strasbourg.

Pour offrir une carrière aux jeunes théoriciens français, pour préparer la formation d'étudiants s'intéressant à la théorie, il est indispensable de **créer en province un certain nombre de chaires et de maîtrises de conférence de physique théorique** ; ces créations auraient lieu au fur et à mesure, lorsque de jeunes docteurs seraient prêts à en remplir les fonctions : or, on peut compter actuellement 4 jeunes docteurs en physique théorique et 4 autres dont les thèses seront bientôt finies.

Il serait donc possible de rétablir, en peu d'années, la proportion raisonnable d'une chaire (ou maîtrise) de physique théorique pour deux expérimentales.

Cette réforme est indispensable si l'on veut assurer aux étudiants une formation d'un niveau élevé et hâter en France le développement d'une des branches les plus vivantes de la science<sup>598</sup> ».

Il est assez difficile de savoir dans quelle mesure Louis de Broglie a été actif dans cette initiative, qui reste de toute façon assez modeste (elle sert uniquement à attirer l'attention sur un problème). Cela montre tout du moins que celui-ci pouvait prêter le prestige de son nom lorsque l'on faisait appel à lui. C'est dans ce sens également que Louis de Broglie semblait agir dans l'invitation par l'Institut Henri Poincaré des physiciens étrangers. Les archives conservées à la bibliothèque de l'Institut laissent entrevoir le processus de sélection et d'invitation de ces chercheurs, qui étaient prévues dans la charte même de cet Institut<sup>599</sup>. Bien que le choix des personnes résultât officiellement d'un processus collégial entrepris par le comité d'orientation de l'Institut (composé notamment de Borel, Langevin, Perrin et Maurain), les correspondances échangées au cours des processus d'invitation permettent de constater que ces invitations portaient souvent de contacts informels entre des physiciens français et étrangers. A l'origine de ces invitations, nous retrouvons des personnalités comme Francis Perrin, Léon Brillouin ou Alexandre Proca, qui entretenaient de véritables relations avec leurs collègues étrangers. Ici encore, Louis de Broglie semble sollicité après coup : lui est alors demandé d'écrire une lettre plus ou moins officielle d'invitation. L'anecdote suivante sur l'invitation de Niels Bohr reflète, semble-t-il, assez bien ce fait. En 1934, Alexandre Proca est à Copenhague auprès de Bohr et il obtient la promesse de celui-ci de venir faire une conférence à l'IHP au printemps 1935. Estimant que pour une invitation aussi prestigieuse, il n'était nullement nécessaire que le comité donne son aval et qu'il suffisait de l'approbation de Borel ou de Louis de Broglie, Proca indique à ce dernier de bien vouloir écrire l'invitation à Niels Bohr. Cette invitation ne venant pas, Proca écrit en Octobre à la secrétaire de l'IHP pour se plaindre de Louis de Broglie :

« J'ai transmis cette prière à M. Louis de Broglie verbalement, en Juin dernier, et j'espérais qu'il allait lui écrire un petit mot, qui aurait suffi. Mais probablement je me suis mal exprimé : j'ai parlé d'une invitation « officielle » et M. de Broglie aura compris qu'une pareille invitation devait émaner du secrétariat. Quoi qu'il en soit, il n'a rien fait, rien écrit. [...] Voudriez-vous donc avoir l'amabilité de rappeler la chose à M. de Broglie et faire une lettre en conséquence. [...] Il serait ridicule de rater M. Bohr parce qu'il aura déjà promis d'aller ailleurs après avoir attendu vainement l'invitation officielle<sup>600</sup> ».

---

<sup>598</sup> Archives de l'Académie des sciences, (Proca / Dossier « correspondance »), Proca (non datée).

<sup>599</sup> À noter cependant que la conférence devait se tenir en langue française. Malgré cette contrainte, les plus grands physiciens théoriciens de l'époque, presque sans exception, sont venus présenter des conférences à l'IHP. Dans certains cas exceptionnels (Niels Bohr), la conférence était traduite de l'anglais en direct (par Léon Rosenfeld).

<sup>600</sup> Proca. Archives conférences IHP, Proca (1934), dossier Bohr.

Louis de Broglie écrira à Niels Bohr fin octobre...pour se voir répondre ce que craignait Proca, à savoir que Niels Bohr avait pris d'autres engagements<sup>601</sup>. Bien qu'anecdotique, cette histoire illustre également quelque chose de plus profond et important : Louis de Broglie n'a jamais eu les réseaux internationaux qui eurent encouragé les jeunes chercheurs français qui l'entouraient à aller se former à l'étranger, mais également à accueillir d'autres chercheurs étrangers. Certes, la difficulté était grande à l'époque pour un jeune physicien français de quitter la France, et les circonstances familiales dans lesquelles il se trouvait étaient une contrainte assez décisive. Ainsi, Pierre Petiau indique qu'il ne put même pas être question pour son père d'envisager un séjour à l'étranger en raison de la nécessité de prendre en charge sa famille. Jean Ullmo fait la même remarque par rapport à son cas. Mais il est très frappant de constater que le critère qui semble séparer les personnes qui restent en France de celles qui iront séjourner à l'étranger soit le degré de proximité avec le groupe Langevin-Perrin-Brillouin-Curie. Ainsi il fut naturel pour Léon Brillouin, Francis Perrin et Jacques Solomon d'effectuer de tels séjours. Il en va de même pour Alexandre Proca, proche de Léon Brillouin et de Paul Langevin. De la même manière, ce groupe de physiciens constituait un foyer pour les nouveaux arrivants. Que ce soient Elsasser, London, Léon Rosenfeld et quelques autres, c'est toujours à travers le contact de ce groupe avec l'étranger que de telles arrivées étaient possibles. Or, les quelques démarches venant de l'entourage de Louis de Broglie et allant dans ce sens viendront bien plus tard. Durant les années 1930, Jacques Winter semble avoir été le seul physicien de la garde rapprochée de Louis de Broglie à avoir séjourné à l'étranger, en Angleterre<sup>602</sup>. C'est seulement dans les années 1940 et 1950 que quelques échanges se créent dans l'entourage de Louis de Broglie (par exemple Jean-Pierre Vigier, qui travaille auprès de David Bohm sur le programme causal, ou encore Mioara Mugur-Schachter, que Louis de Broglie fait venir en 1964 de Roumanie pour effectuer une thèse sur l'invalidation de la preuve de Von Neumann sur les variables cachées). Une remarque peut être faite à ce stade : ces échanges ne s'insèrent pas dans les courants principaux de la physique théorique internationale, et s'imbriquent même dans des programmes de recherches assez marginaux. Et il est remarquable de constater que Louis de Broglie ne deviendra « internationalement socialisé » qu'à partir du moment où il reprendra son programme de recherche sur la double solution. Il sera effectivement alors beaucoup plus inséré dans cette petite communauté de physiciens théoriciens et de philosophes (Bohm, Shimony, etc.) qui s'intéressaient alors aux problèmes des fondements de la mécanique quantique. C'est visiblement uniquement à partir de cette période que Louis de Broglie semble posséder une véritable correspondance scientifique, tandis que les lettres échangées avec les « monstres sacrés de la mécanique quantique » (Pauli, Heisenberg, etc.) n'étaient la plupart du temps que de courtoisie<sup>603</sup>.

Nous pouvons citer encore deux exemples pour lesquels Louis de Broglie a utilisé son nom pour porter concours à des initiatives qui n'émanaient pas directement de lui. Le premier exemple concerne le soutien qu'il donna à Raymond Daudel dans sa tentative de faire prospérer les applications de la mécanique ondulatoire à la chimie. Daudel s'initie à la physique théorique auprès de Louis de Broglie à l'occasion de ses cours et ses séminaires, et en devient un des auditeurs les plus fidèles. Consacrant ses recherches aux applications de la mécanique ondulatoire à l'étude des propriétés des atomes et des molécules, il a également l'ambition de faire prospérer ce champ de recherche en France. Il fonde le Centre de Chimie Théorique de France en 1943 et assure sa pérennité en mettant à

<sup>601</sup> La « péripétie Bohr » se poursuivra puisque s'engageant à venir l'année suivante, Bohr sera de nouveau amené à repousser l'invitation et ne viendra en France qu'en janvier 1937.

<sup>602</sup> D'après Ullmo (1963).

<sup>603</sup> C'est ce que semble en tout cas révéler ses archives. Il faut cependant rester prudent quant à cette conclusion car Louis de Broglie n'a pas conservé systématiquement sa correspondance.

la tête de son Comité de direction des personnalités aussi prestigieuses que Irène et Frédéric Joliot-Curie et... Louis de Broglie. Devenu en 1957 le Centre de Mécanique Ondulatoire du CNRS, ce centre aura alors Louis de Broglie comme président<sup>604</sup>. Le second exemple concerne la création du CERN. Il a longtemps été dit et pensé, et les élèves de Louis de Broglie ne sont pas les derniers à avoir propagé cette idée, que Louis de Broglie avait joué un rôle si ce n'est décisif, du moins important dans la création du CERN. En réalité, comme l'ont montré Pestre, Hermann et Krige, la création du CERN est l'aboutissement d'un processus complexe mettant en jeu une variété de motivations provenant de scientifiques européens cherchant à accroître leurs moyens, en vue de rester compétitifs vis-à-vis des anglo-saxons, et d'hommes politiques voulant éviter le *brain drain*. Parmi les Français les plus actifs dans ce processus, on retrouve côté scientifique des personnalités comme Francis Perrin, Pierre Auger ou encore Kowarski. Le fait d'armes de Louis de Broglie dans cette aventure est d'avoir prononcé un discours, sur la suggestion de Raoul Dautry<sup>605</sup>, à la conférence de Lausanne de 1949 au cours de laquelle le projet européen de collaboration scientifique fut officiellement lancé. Louis de Broglie y appelait notamment à la création d'un laboratoire ou d'un Institut européen au sein duquel un niveau d'activité scientifique allant au-delà de celui permis par chaque pays isolé serait possible. Dans cette histoire, Louis de Broglie occupe une place bien modeste par rapport à celle de ses collègues français que nous venons de citer.

Nous pouvons en résumé dire que Louis de Broglie a eu un rôle assez passif dans les différentes initiatives auxquelles il a été amené à participer. N'hésitant pas à mettre le poids de son nom au service d'une cause qu'il approuve, Louis de Broglie n'a semble-t-il été à l'origine d'aucune entreprise visant à faire progresser la physique théorique dans son pays.

## b) Le pilotage de la physique théorique

Il n'en reste pas moins que, du fait de sa place prééminente dans la physique théorique française, le soutien accordé par Louis de Broglie à un certain nombre de ses élèves a été d'une importance capitale dans leur carrière, et, *in fine*, dans certaines orientations de la discipline. Le mode particulier de scrutin pour l'élection des professeurs et des maîtres de conférences à la Sorbonne faisait en sorte que détenir le soutien de Louis de Broglie était un grand atout. Certes sa très grande réserve et sa timidité ne lui permettaient pas, comme le concède Georges Lochak, « de s'imposer en commission ». En revanche, dans la mesure où des professeurs extérieurs à la spécialité participaient au scrutin, le statut de Louis de lui conférait un poids très grand dans la prise de décision, souvent effectuée en amont du vote. Étant donnée la portion congrue qui était de toute manière réservée à la physique théorique en France, l'enjeu d'une nomination à une chaire pouvait être important. À cet égard, le sort réservé à deux individus, Alexandre Proca et Jean-Louis Destouches, semble avoir cristallisé l'opinion d'une grande partie de la population des physiciens d'après-guerre sur le rôle joué par Louis de Broglie dans l'orientation de la physique théorique française. Il convient donc de s'arrêter quelque peu sur ce sujet.

Pendant la seconde guerre mondiale, Alexandre Proca s'implante au Portugal où il fonde, en compagnie de Guido Beck un séminaire de physique théorique. À la suite d'un passage en Grande-Bretagne à la fin du conflit, il désire participer au renouveau de la France, mais hésite cependant à

---

<sup>604</sup> Voir Daudel (1988).

<sup>605</sup> Hermann, Krige, Mersits, Pestre (1987).

rentrer de peur que son pays d'adoption ne lui offre pas la place qu'il revendique. Il confie ainsi ses doutes et ses craintes à Paul Langevin :

« Je vais donc rentrer à Paris et me remettre au travail. Au moment de rentrer cependant, je dois me poser, froidement, une question à laquelle je vous serais infiniment reconnaissant de répondre. Elle peut se formuler de diverses façons, qui toutes, au fond reviennent à se demander si la France voudra bien m'accueillir, j'entends m'accueillir comme Français et comme homme [...]. Je me demande si, par exemple, l'Université pour laquelle j'ai tant travaillé m'accueillera enfin autrement que comme boursier au CNRS<sup>606</sup>. »

À sa rentrée, Proca devient très actif dans le nouveau paysage français et organise notamment un séminaire qui sera souvent considéré comme le point de départ du renouvellement de la physique théorique française. En 1949, une chaire à la Sorbonne est rendue disponible, et c'est naturellement que Proca pose sa candidature. Proca compense une faiblesse dans son dossier sur l'enseignement (en 1934, il est victime d'une loi rétroactive l'empêchant d'exercer une activité d'enseignement) par de beaux atouts à faire valoir : outre une activité scientifique intense, concrétisée par la découverte d'une équation connue internationalement sous le nom « d'équation de Proca », ce physicien s'est illustré également par une activité de publication des annales de l'IHP, et c'est également grâce à lui que les physiciens français peuvent bénéficier d'une traduction française des grands classiques de la mécanique quantique que sont les *Principes de la mécanique quantique* de Dirac (traduit en Français par Proca en 1931), les *Mémoires sur la Mécanique ondulatoire* de Schrödinger (traduit en 1933) et les *Fondements mathématiques de la Mécanique quantique* de Von Neumann (traduit en 1946, avant la traduction anglaise !). Il est à la tête d'un noyau assez solide de jeunes théoriciens français très prometteurs à l'instar de Jacques Prentki, Claude Marthy ou encore Maurice Jean. Enfin, il reçoit une consécration internationale en étant invité au conseil Solvay prévu en 1939, conseil qui n'aura malheureusement jamais lieu à cause de la guerre. Face à lui cependant se présente Jean-Louis Destouches, qui a la particularité de posséder un doctorat de philosophie et qui bénéficie bien sûr du soutien de Louis de Broglie. C'est Jean-Louis Destouches qui obtient le poste. Quelles ont été les conséquences d'un tel soutien ? On ne doit a priori pas exagérer l'importance de ce choix, même si elle existe. La mécanique quantique n'était alors enseignée qu'avec parcimonie en Sorbonne (mis à part les cours de Louis de Broglie, il existait par exemple le cours de Soleillet<sup>607</sup>, mais celui-ci n'était pas de très bonne qualité d'après Friedel<sup>608</sup>). Par ailleurs, l'orientation très particulière de Jean-Louis Destouches l'amenait à enseigner la mécanique quantique d'une manière qui ne pouvait pas être très utile pour les étudiants soucieux de l'appliquer à des problèmes concrets. Sans parler même de la qualité de l'enseignement<sup>609</sup>, le cours magistral demeure un moyen privilégié pour recruter des étudiants, comme l'avait déjà montré Louis de Broglie et comme le montreront par la suite Maurice Lévy et Jacques Friedel. À cet égard, Destouches a sans doute détourné de voies qui seront jugées - par les physiciens d'après-guerre - comme étant plus conventionnelles une petite partie du potentiel théorique français. C'est du moins ce que lui reproche Anatole Abragam :

---

<sup>606</sup> Archives de l'Académie des sciences, (Proca / Dossier « correspondance »), Proca (1944).

<sup>607</sup> Voir les carnets de l'étudiant (Académie de Paris, (1920-1960)).

<sup>608</sup> Friedel (2011).

<sup>609</sup> À un tel niveau d'études, le moyen privilégié pour s'approprier une théorie est souvent plus le livre que l'enseignement magistral.



« [Destouches] avait organisé autour de Louis de Broglie, qu'il avait su impressionner par l'abstraction de ses travaux et qu'il flattait outrageusement, une espèce de garde prétorienne qui formait un écran vis-à-vis du monde extérieur. Il a ainsi contribué à isoler de Broglie, et à travers lui la physique théorique française, des contacts fructueux avec l'étranger, qu'aurait pu créer l'immense prestige de de Broglie. Même si de Broglie n'avait pas, ou n'avait plus, personnellement, comme je suis enclin à le penser, les qualités nécessaires pour servir de maître à penser aux jeunes physiciens de son temps, son séminaire aurait pu servir de pôle d'attraction et de lieu de rencontre aux talents du monde entier. Alexandre Proca, sur qui, en tant que savant, je ne veux pas porter de jugement car on pourrait croire que je m'acharne sur les morts, avait su, lui, à partir de 1946, faire de son séminaire un centre vivant où de jeunes physiciens français et étrangers se rencontraient, discutaient, rompaient cette chape de plomb de l'isolement dont j'ai tant souffert [...]. Mon second reproche à Destouches est d'avoir pendant plusieurs années, comme enseignant et comme directeur de recherche, freiné le développement de la physique théorique dans notre pays en essayant d'entraîner des jeunes dans des voies sans issue<sup>610</sup>. »

Au-delà des jugements un peu péjoratifs sur l'action de Destouches, il reste des faits difficilement contestables. Avant même sa nomination à la chaire en question, la place tout à fait centrale qu'occupait Destouches au sein du séminaire de Broglie (on rappelle qu'il en est lui-même à l'origine), sa capacité à avoir des élèves et à imposer des thématiques de recherche (que ce soit au séminaire ou dans ses cours) très éloignées des préoccupations usuelles de la physique théorique internationale, ont sans aucun doute eu un impact non négligeable sur l'isolement et la direction des recherches théoriques françaises.

Mais la nomination qui fut la plus polémique est celle, l'année suivante et à la surprise générale, de Jean Laval, au Collège de France. Il s'agit de la chaire de Léon Brillouin, partant pour les Etats-Unis, qui est laissée vacante. Un des premiers enjeux de cette élection est le maintien de la dénomination « Théories Physiques ». Celui-ci étant acquis, Proca semble être le candidat naturel à la succession d'un Brillouin qui, d'ailleurs, le soutient. Cependant, trois chercheurs lui font face : Jean Laval, Marie-Antoinette Tonnelat et Gérard Petiau. D'après George Proca (fils d'Alexandre), il y aurait eu également certaines manœuvres visant à mettre en avant des candidats supplémentaires, candidats qui se seraient cependant ravisés après avoir pris connaissance de la candidature de Proca<sup>611</sup>. Paul Fallot, professeur de Géologie méditerranéenne au Collège de France, écrit à Max Born le 13 Février 1950 pour lui demander son opinion sur les mérites respectifs des candidats. D'après ce que dira ultérieurement ce dernier à Proca, Fallot reste imprécis concernant l'intitulé de la chaire, et omet d'indiquer qu'il s'agit de la succession de la chaire de Léon Brillouin :

« I remember clearly that I very much wondered how these two names could appear as candidates for the same post, and I thought it was a chair of physics in general. Now reading Fallot's letter again, I see that he says, he wishes to have my opinion about a question of mathematical or theoretical physics. Anyhow, I had no idea that it was Brillouin's chair which of course was purely theoretical<sup>612</sup>. »

Malheureusement pour Alexandre Proca, Max Born apprécie particulièrement les travaux de Jean Laval – qui comme lui, est particulièrement impliqué dans la physique des cristaux - et insiste longuement sur ses mérites dans sa réponse à Fallot, comme il le confesse lui-même à Proca :

---

<sup>610</sup> Abragam (1989), p. 64.

<sup>611</sup> Proca (1988), introduction.

<sup>612</sup> Archives personnelles de Proca, Born (1950).



« Therefore I cannot check my wording but I remember well that my intention was to express the opinion: if you want a theoretician, take Proca ; if you want a man who is mainly experimentalist, but also knows some parts of theoretical physics very well, take Laval. Now I have a very high opinion of Laval work, and I have just read some of his papers. Thus my account of his work became more detailed than that yours. My wife, who is always wiser than myself in such matters, told me that the letter stressed Laval's merits too much. Now I was too indolent or lazy to re-write the letter and sent it off. I cannot tell you how much I regret it.<sup>613</sup> »

Ce qui se serait passé lors de l'élection aurait été décrit à Proca par des témoins oculaires proches de celui-ci, de la manière suivante :

« The majority of the professors are humanists and for a scientific election they of course believe what they know and what they are told by people in whom they have confident. When the day of the election came, they discussed the whole thing and, in order to show that Laval was best fitted for professorships of theoretical physics and as a successor of Brillouin, a letter from [Born] was product saying that Laval's papers were good. [...] The whole thing was presented in fact as [...] a definite affirmation of such an outstanding personality as professor Born who thought implicitly (they did no say it, of course) that the best successor of Brillouin for a professorship in theoretical physics was Laval<sup>614</sup>. »

Tenu informé de l'évènement, Léon Brillouin réagit en ces termes :

« L'histoire du Collège de France est scandaleuse ! Ces intrigues personnelles et politiques, dans la France d'après guerre, me révoltent et m'indignent. Vraiment, le visage du pays ne se reconnaît plus sous ces masques grimaçants<sup>615</sup> ».

Derrière la polémique en effet existe une suspicion que des raisons politiques soient en jeu. Cette élection succède seulement de quelques années à l'élection de Maurice de Broglie au Collège de France, en lieu et place de Paul Langevin alors en captivité, élection qui avait suscité de vives réactions d'indignation de la part des amis de Langevin et des physiciens de gauche<sup>616</sup>. Le climat était alors tendu entre un clan composé de personnalités conservatrices ou nationalistes et un clan composé de personnes classées à gauche. Une personne comme Fallot était par exemple connue pour son nationalisme scientifique<sup>617</sup>. Les origines étrangères d'Alexandre Proca ne pouvaient donc manquer de donner une coloration toute particulière à sa non-élection, qui succède de plus à des interrogations que l'intéressé se posait déjà<sup>618</sup>. À travers Fallot, et en raison de la présence de Maurice de Broglie, c'est également Louis de Broglie qui est suspecté d'avoir tout fait pour barrer la route d'Alexandre Proca, notamment dans la notice biographique de ce dernier que son fils a écrite.

Quelle qu'ait été l'attitude réelle de Louis de Broglie, le sentiment que l'on ne pouvait pas espérer accéder aux postes importants en physique théorique en ayant Louis de Broglie comme adversaire est largement répandu parmi les protagonistes de l'époque et transparaît par exemple très nettement à travers le témoignage de Maurice Lévy :

---

<sup>613</sup> *Ibid.*

<sup>614</sup> Archives personnelles de Proca, Proca (1950).

<sup>615</sup> Archives personnelles de Proca, Brillouin (1950).

<sup>616</sup> Voir Brillouin (1962).

<sup>617</sup> Durand-Delga (1961).

<sup>618</sup> Voir Archives de l'Académie des sciences, (Proca / Dossier « correspondance »), Proca (1944).

« [Contrairement à Proca], je n'ai jamais été l'anti-de Broglie. Si j'ai réussi dans ce que j'ai fait pour la physique théorique, c'est grâce au fait que je ne me suis jamais mis de Broglie à dos » Et plus loin : « [Lors de ma nomination en tant que maître de conférences], il n'y a eu aucune opposition de la part de Louis de Broglie. [Il] avait fait un barrage total pour Proca. Je n'ai jamais compris pourquoi. Peut-être parce que Proca n'avait pas été adroit. Très vite, il s'était mis en opposant à Louis de Broglie. [...] Louis de Broglie s'est opposé violement à la nomination de Proca à la Sorbonne et au Collège de France. [...] Enfin, toujours est-il que moi, pour une raison que j'ignore, il n'y a eu aucun candidat contre moi, j'ai été élu à l'unanimité, c'est-à-dire que Louis de Broglie n'a pas voté contre [...]. Enfin il a laissé faire complètement. Et il savait pourtant très bien – tout le monde savait – que j'allais former un groupe – cela faisait déjà un an que j'étais à l'Ecole Normale – et que ce groupe allait grossir et serait complètement en dehors de son influence. Donc il avait des raisons de s'opposer, mais il ne l'a absolument pas fait.<sup>619</sup> ».

Mais on peut se demander à quel point ce sentiment est justifié. Lors de l'évènement du Collège de France, deux des trois concurrents d'Alexandre Proca étaient éminemment proches de Louis de Broglie (Tonnelat et Petiau) mais c'est Laval qui a finalement été choisi<sup>620</sup>. À n'en pas douter, de Broglie a privilégié, quand il a pu, la candidature de ses élèves, qu'ils se nomment Destouches, Tonnelat ou Petiau ou encore Daudel<sup>621</sup>. À n'en pas douter également, cela s'est fait au détriment d'Alexandre Proca. Mais affirmer que Louis de Broglie a volontairement empêché Proca de faire carrière représente un pas supplémentaire qu'il est extrêmement périlleux de franchir<sup>622</sup>. D'une part, même si ce n'est pas vraiment concluant, Louis de Broglie est intervenu à quelques reprises en faveur d'Alexandre Proca auprès de la Caisse nationale des sciences ou encore du ministère des affaires étrangères durant les années 1930<sup>623</sup>. D'autre part, la personnalité extrêmement réservée du personnage rend assez improbable qu'il soit à l'origine de telles manœuvres<sup>624</sup>.

D'un point de vue général, il semble que Louis de Broglie n'a jamais eu un goût prononcé pour l'administration de la science et qu'il s'est en général contenté de faire ce que le sens du devoir lui dictait. Cet aspect de sa conduite ne peut pas être dissocié de deux traits de sa personnalité : d'une part son peu d'intérêt porté aux questions politiques<sup>625</sup> et d'autre part son caractère extrêmement introverti. Ce dernier aspect a souvent été invoqué, mais nous pouvons nous y arrêter ici un peu plus longtemps. Cette information repose sur un faisceau de témoignages extrêmement convergents. Nous pouvons par exemple citer l'anecdote suivante de Louis Leprince-Ringuet :

« Tout jeune, il était, semble-t-il, un enfant « sociable et turbulent », selon l'expression de son Maurice [de Broglie] lorsqu'il reçut son frère à l'Académie française en 1945. Quant à moi, je ne l'ai

<sup>619</sup> Lévy (2011).

<sup>620</sup> Tonnelat obtiendra cependant une chaire à la Sorbonne en 1956.

<sup>621</sup> Raymond Daudel est nommé à une maîtrise de conférence à la Sorbonne que, d'après les dires même de l'intéressé, « Louis de Broglie demanda et obtint » pour lui en 1957. Daudel (1988).

<sup>622</sup> Jacques Prentki, qui était un des plus proches élèves d'Alexandre Proca, a d'ailleurs refusé de préfacer l'ouvrage de Georges Proca sur son père en partie pour cette raison. (Archives personnelles de Proca, Prentki (1987).

<sup>623</sup> Lettres de soutien qu'on peut retrouver dans les archives Proca déposées à l'Académie des sciences.

<sup>624</sup> Ceci n'est bien sûr qu'un argument de vraisemblance, en aucun cas décisif, mais en l'absence d'éléments concrets indiquant le contraire, il conserve toute sa force. D'autre part, cela n'implique pas que Louis de Broglie n'ait pas été lui-même instrumentalisé en participant de manière inconsciente à une telle manœuvre.

<sup>625</sup> Au sens large, incluant la politique scientifique. Mais il est à noter qu'au sens plus spécifique du terme, bien qu'ayant souvent été étiqueté comme « conservateur » (dans le meilleur des cas), voire comme « réactionnaire » et « pétainiste », Louis de Broglie n'a semble-t-il jamais exprimé ses opinions politiques en public. Georges Lochak, qui fut un des derniers proches de Louis de Broglie, indique qu'il était très réservé sur ces questions.

jamais connu ni turbulent ni sociable, mais essentiellement austère, discret et même sauvage<sup>626</sup>. [...] J'ai gardé un souvenir parfait de la cérémonie organisée pour le jeune lauréat [du prix Nobel de physique en 1929] par sa sœur Pauline de Pange, dans sa demeure de la rue de Varenne, car je venais d'entrer au laboratoire quelques mois plus tôt. C'était une réception superbe, associant les plus célèbres personnalités. Lorsque les salons furent remplis par la foule d'invités, une inquiétude gagna la maîtresse de maison et progressivement ses hôtes : pas de Louis de Broglie ! Enfin, au bout de quelque temps, on vit arriver un jeune homme timide, rasant les murs pour aller s'asseoir discrètement dans un coin<sup>627</sup>. »

On pourrait ici multiplier les témoignages : ceux de Lochak, d'Abragam, de d'Espagnat, de Rosenfeld, d'Elsasser, de ceux qui l'ont côtoyé de près ou de loin. Tous décrivent une personnalité extrêmement timide, introvertie (à la limite de l'asociabilité), et en même temps toujours extrêmement courtoise.

### 3- Louis de Broglie, l'enseignement et la diffusion de la mécanique quantique

Un autre aspect que j'analyserai ici est l'action de Louis de Broglie dans la diffusion du savoir portant sur la mécanique quantique. Trois éléments me semblent ici devoir être pris en compte : d'abord son rôle en tant qu'enseignant, ensuite, son action et sa pensée en faveur la dissémination de la mécanique quantique dans l'enseignement supérieur, et enfin son activité de vulgarisation vers un plus large public.

#### a) Louis de Broglie enseignant

En tant qu'enseignant, le bilan de Louis de Broglie peut être perçu comme étant contrasté. Professeur à la Sorbonne, Louis de Broglie s'est en réalité comporté comme un professeur au Collège de France : le contenu de son cours était renouvelé chaque année, et portait généralement sur des thématiques proches de ses propres sujets de recherche. Nous possédons la liste de ses enseignements en Sorbonne<sup>628</sup> qui nous montre à quel point le contenu de ce cours était seulement adapté à des chercheurs ou des étudiants déjà très avancés et déjà familiers avec la mécanique quantique. Seuls peut-être ses deux premiers cours font exceptions et peuvent être considérés comme de véritables cours d'introduction à la mécanique quantique. Ce n'est qu'à partir de l'année universitaire 1954-1955 que de Broglie proposera dans le cadre du certificat de Physique Théorique un cours élémentaire de mécanique ondulatoire. D'autre part, l'analyse de leur contenu<sup>629</sup> permet de constater que ces cours ont pour principal objectif de convaincre l'auditeur (ou le lecteur) du bien fondé des théories qu'il présente, en insistant longuement, et quelques fois de manière assez exhaustive sur le contexte empirico-théorique de leur découverte, plutôt que de donner aux lecteurs les outils utiles à une appropriation rapide et efficace de la théorie et à son application à la résolution de problèmes.

Nous pouvons donner comme exemple typique le livre qui dérive de son cours de 1930-1931 et qui porte sur la théorie de l'électron de Dirac<sup>630</sup>. Remarquons que le sujet est en soi d'un niveau déjà

---

<sup>626</sup> Néel (1991), p. 38.

<sup>627</sup> *Ibid.* p. 44.

<sup>628</sup> Archives de l'Académie des sciences, (42J/Boîte 1), Liste des cours.

<sup>629</sup> Ces cours ont été quasi-systématiquement publiés.

<sup>630</sup> De Broglie (1934).

avancé, puisqu'il s'agit d'un domaine de la physique quantique relativiste qui était alors au centre des recherches de pointe en physique théorique et sur lequel des physiciens de la trempe de Pauli et Heisenberg butaient encore. Peu de gens en France pouvaient suivre alors de tels développements. Ensuite, nous constatons que presque la moitié du livre est consacrée à la présentation des problèmes qui ont poussé les physiciens (en l'occurrence Dirac) à inventer cette théorie. En rentrant à chaque fois dans les questions techniques de fond, Louis de Broglie parcourt presque toute l'histoire de la physique atomique. En commençant par la découverte des séries de Lyman et de Balmer, il retrace ensuite tour à tour la découverte de la loi de Ritz, l'atome de Bohr, l'effet Zeeman et la structure fine, l'atome de Bohr-Sommerfeld, l'effet Zeeman anormal, la découverte de la mécanique ondulatoire et son insuffisance dans le domaine de la relativité, la découverte du spin, les premières tentatives faites pour l'intégrer dans le formalisme de la mécanique ondulatoire (Pauli), et seulement enfin la théorie de Dirac. Ce livre, et en général, ses livres, toujours très bien écrits, sont de très bonne qualité pédagogique et extrêmement instructifs pour quiconque veut atteindre une compréhension profonde de l'édifice conceptuel de la physique moderne et se faire une idée de la nécessité de l'introduction de certaines hypothèses ou certains points de vue. En revanche, ils ont dérouté de nombreux étudiants. L'un d'eux, Pierre-Gilles de Gennes, raconte :

« Physicien tout débutant (en 51/52) j'ai été auditeur de deux cours très différents donnés par Louis de Broglie. Le premier — que beaucoup d'entre nous ont connu — était en principe une introduction à la mécanique quantique. En réalité il s'agissait d'une réflexion sur l'analogie optique géométrique mécanique classique / optique physique mécanique ondulatoire. Cette réflexion était esthétique, profonde — et absolument inadaptée aux besoins des gamins de 19 ans que nous étions. J'ai été vite aspiré vers des enseignements plus pragmatiques — le livre de Schiff, un cours d'Edmond Bauer, un autre d'Aigrain, et plus tard celui d'Albert Messiah. C'est seulement plus tard, après avoir appris les « Path integrals » dans Dirac et Feynman, que j'ai vraiment compris le message que nous offrait Louis de Broglie<sup>631</sup> ».

Puisque de Gennes évoque le cours d'Edmond Bauer, nous pouvons par contraste citer le jugement que portait Lochak sur ces deux cours :

« Bien que le cours de Louis de Broglie fut élémentaire et, en principe, traditionnel<sup>632</sup>, il m'enchantait. J'avais déjà suivi le cours de mécanique quantique d'Edmond Bauer à l'Institut de chimie physique, en face de l'IHP, mais ce n'était qu'un livre de recettes, comme presque tous les cours de mécanique quantique. Avec de Broglie, le ton était différent. Il essayait de rendre les résultats plus intuitifs, en indiquant, ne serait-ce que brièvement, le fil conducteur qui y avait mené, et, lorsque le fil normal de l'induction théorique se rompait, comme dans la théorie des systèmes de particules, il le faisait discrètement sentir : « Là, on est obligé de suivre une voie détournée. ». De même, pour le principe d'exclusion, il commençait par montrer les faits qui avaient guidé Pauli, avant d'ajouter : « On est ainsi conduit à poser un nouveau principe qu'actuellement les principes de base de la mécanique ondulatoire n'expliquent pas. ». De telles choses, dans les cours que j'avais suivis en face, étaient « parachutées » sur un ton d'évidence qui m'a particulièrement choqué à propos des systèmes de particules : Bauer ayant annoncé un jour que nous verrions l'équation la semaine suivante, j'ai tenté vainement de l'établir par la voie qui me paraissait normale, en rassemblant plusieurs ondes de de Broglie. Je fus déçu d'apprendre qu'il n'y avait qu'une seule onde, dans un espace abstrait, et que l'équation sortait d'une devinette (d'ailleurs géniale). Bauer, lui, n'y voyait rien d'anormal, tout comme ses auditeurs. Je me sentis isolé et à partir de ce jour-là je n'ai « plus compris » la mécanique

<sup>631</sup> De Gennes (1988), p. 73.

<sup>632</sup> Au sens qu'il reste fidèle à l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique.

ondulatoire. Je ne saurais dire mon soulagement quand je sentis, à un détour de phrase de de Broglie, que lui non plus « ne comprenait pas » ! <sup>633</sup>»

On peut donc comprendre que ces cours étaient aptes à attirer des individus plutôt portés vers la compréhension des concepts physiques que vers la résolution des problèmes. Il faut par ailleurs souligner que, en dehors du contenu, la présentation de ces cours n'était pas forcément le point fort de Louis de Broglie. Écrivant son cours chaque année pendant les mois d'été sur un cahier, il se contentait ensuite de le lire devant son auditoire et de recopier les formules, « jusqu'à [celle de] sa propre longueur d'onde » indique Lochak. Cette médiocre qualité d'exposition a sans doute joué dans le fait que les cours qu'il professait à partir de 1934 à l'ENS n'avaient que très peu de succès auprès des étudiants <sup>634</sup>.

#### b) La pensée de Louis de Broglie sur l'enseignement de la physique

Outre son activité d'enseignant, Louis de Broglie a également été consulté pour donner son avis sur les questions de l'enseignement. Nous trouvons ainsi trace dans ses archives d'un compte rendu écrit en août 1944 sur la question de l'enseignement de la physique à l'École Polytechnique <sup>635</sup>. Louis de Broglie y milite pour un mode d'exposition des sciences qui est plutôt en accord avec sa propre pratique de l'enseignement, et qui correspond très bien avec ce que Dominique Pestre a qualifié d'historico-inductif :

« [...] il faut, me semble-t-il, préférer aux exposés abstraits et dogmatiques une méthode plus souple qui part de la constatation des faits et des lois expérimentales et qui montre comment, à la suite de tâtonnements divers et à l'aide de raisonnements inductifs ou analogiques, on est parvenu à relier peu à peu ces faits et ces lois expérimentales par des liens rationnels en constituant ces systèmes logiques cohérents que sont les théories de la Physique <sup>636</sup> »

Pour le contenu des enseignements, Louis de Broglie suggère que l'Ecole Polytechnique conserve un rôle de transmission d'une connaissance théorique générale de la physique, laissant aux Ecoles d'applications le soin d'approfondir les savoir-faire expérimentaux et les connaissances théoriques particulières. L'accent devra donc être mis sur l'enseignement de la mécanique physique, de l'optique, de l'électromagnétisme et de la thermodynamique. Mais la question la plus intéressante, comme le reconnaît Louis de Broglie lui-même, est celle de savoir s'il faut « dans les programmes de ces diverses Ecoles faire place, à côté des grandes théories de la Physique classique [...], à l'étude de certaines questions à l'ordre du jour de la Physique contemporaine telles que la Relativité, les quanta ou la Mécanique ondulatoire ». La réponse de Louis de Broglie est cependant assez décevante pour quiconque s'attendait à le voir militer pour un élargissement de l'enseignement de ces théories :

« Mon opinion sur ce point est que, si l'on veut faire une certaine place dans l'enseignement des Ecoles en question aux problèmes de la Physique nouvelle, cette place ne peut être qu'assez restreinte. Les conquêtes de la physique contemporaine ont un intérêt et un attrait incontestables : elles nous ont ouvert les portes du monde mystérieux des phénomènes atomiques et subatomiques,

---

<sup>633</sup> Lochak (1992), p. 206.

<sup>634</sup> Lurçat (2011).

<sup>635</sup> Archives de l'Académie des sciences, (42J/Boîte 40), De Broglie (1944-A).

<sup>636</sup> *Ibid.*

conduisant même jusqu'au noyau de l'atome [...]. Mais la Physique relativiste, atomique et quantique a, jusqu'ici tout du moins, assez peu d'applications pratiques ».

Étant donné donc, selon de Broglie, le caractère technique des carrières des polytechniciens, un apprentissage de ces nouvelles théories ne leur serait d'aucune utilité, du moins sur le plan de leur carrière professionnelle, et ce jusqu'à nouvel ordre, en l'occurrence, jusqu'à ce que cette physique contemporaine trouve enfin des applications (Louis de Broglie évoque l'éventualité d'une exploitation de l'énergie contenue dans l'atome... nous sommes pourtant à la veille de l'explosion d'Hiroshima !). De Broglie reconnaît d'autre part que, traditionnellement, l'École Polytechnique a contribué aux progrès des sciences et qu'il ne faut pas couper totalement ses élèves des pans les plus actifs de la recherche fondamentale. Mais à dire vrai, le principal intérêt que semble voir Louis de Broglie à un enseignement très succinct de cette partie de la physique semble être purement intellectuel :

« En prenant une connaissance même sommaire de leur histoire et de leur état actuel, on recueille cet enseignement essentiel que la science n'est jamais achevée, qu'elle peut toujours nous apporter demain, si nous la cultivons, des révélations imprévues d'un passionnant intérêt. En constatant que les conceptions en apparence les plus claires et les mieux établies de la Physique classique telles que celles de temps, d'espace, de localisation, de déterminisme etc. ont dû être profondément modifiées quand on a abordé l'étude des phénomènes de l'échelle atomique, on prend conscience de l'évolution des notions scientifiques et c'est là un enseignement d'une très haute portée ».

Lorsque l'on songe d'une part aux applications nombreuses qu'allait connaître la physique quantique dans les années qui suivent (que l'on pense à la chimie, à l'optique — pompage optique, laser —, à la résonance magnétique, à l'étude de l'état solide, à la physique nucléaire) et d'autre part aux polytechniciens qui allaient contribuer à ces aventures (Friedel, Messiah, Bloch, Horowitz...), on peut penser que Louis de Broglie n'a pas fait preuve d'une grande capacité d'anticipation. Si ce genre de jugement rétrospectif reste assez périlleux<sup>637</sup>, nous pouvons du moins constater que Louis de Broglie n'a pas vraiment cru à un rapide développement des applications quantiques, et que son principal intérêt vis-à-vis de cette théorie soit resté avant tout intellectuel.

Cinq ans plus tard, à l'occasion de l'écriture d'un nouvel article portant sur l'enseignement supérieur, le ton de Louis de Broglie est quelque peu différent<sup>638</sup>. Il reconnaît maintenant qu'outre tout « l'intérêt spéculatif » qui réside dans cette physique nouvelle<sup>639</sup>, « elle nous a aussi, parce qu'en définitif, savoir c'est pouvoir, permis de réaliser des applications nouvelles » (Louis de Broglie fait ici référence aux applications de l'« Electronique » dans le développement de la Radioélectricité, de la télévision ou de l'optique électronique, et de la physique atomique dans le développement de la maîtrise de l'énergie nucléaire). Dans ces conditions, la question de l'enseignement scientifique se retrouve renouvelée. Se voulant résolument modéré, Louis de Broglie tente alors de résoudre cet épineux problème en dégagant les lignes de forces des deux principales conceptions qui s'affrontent (la conception conservatrice et la conception réformatrice) et de choisir une voie intermédiaire. Reprenant point par point les différents arguments des uns et des autres, son opinion balance cependant, sans qu'il le concède, du côté « conservateur ». Pour ces derniers, l'esprit de l'étudiant doit

---

<sup>637</sup> Par exemple, il n'était pas du tout évident avant la fin de la guerre que l'Ecole Polytechnique aurait vocation à jouer de nouveau un grand rôle dans le renouveau de la recherche en France. Voir Pestre (1994-B).

<sup>638</sup> De Broglie (1949).

<sup>639</sup> *Ibid.*



revivre les principaux stades du développement de la physique dans l'ordre historique (partant des lois macroscopiques découvertes en premier) plutôt que dans l'ordre logique (partant des lois des constituants élémentaires de la matière pour remonter aux lois des objets macroscopiques qu'ils composent). Or, Louis de Broglie leur concède d'une part que les fondations des lois microscopiques ne sont pas encore solides pour pouvoir sans risque les enseigner et d'autre part que la difficulté de se les approprier est également beaucoup plus grande que celle de leurs correspondantes macroscopiques. De la même manière, les applications de la physique classique restent plus nombreuses que celles, même en plein développement, de la physique microscopique. Il est donc dans l'intérêt d'un plus grand nombre d'étudiants de l'enseignement supérieur de mettre l'accent sur la physique classique : les individus qui auront à apprendre la physique microscopique pourront toujours le faire plus tard dans leur cursus de formation ou dans leur carrière. Finalement, Louis de Broglie concède seulement aux réformistes le fait qu'il semble inadmissible que des connaissances qui se sont déjà diffusées dans le grand public ne soient pas au moins acquises de manière sommaire par des étudiants en physique. Le « compromis » auquel parvient Louis de Broglie peut alors s'énoncer :

« Examen approfondi de la physique classique, vue générale de la physique atomique sans trop rentrer dans les détails incertains et difficiles, telle nous paraît être la meilleure formule pour les débuts de l'enseignement de la Physique supérieure dans les établissements de haut enseignement. Naturellement si les études se prolongent, si les élèves ont en vue de devenir des physiciens ou des professeurs d'un niveau élevé, l'heure viendra pour eux d'approfondir la Physique atomique sous tous ses aspects, mais ce travail ne leur sera profitable et sans inconvénient que s'ils possèdent en Physique classique des bases bien assurées<sup>640</sup> ».

Bien que penchant du côté « conservateur », la position défendue par Louis de Broglie sur l'enseignement de la physique moderne est encore celle qui semble plutôt dominer de nos jours, et peut d'ailleurs se défendre<sup>641</sup>. L'idée selon laquelle les opinions de ce savant auraient pu être un obstacle à une diffusion plus rapide des nouvelles théories dans l'enseignement supérieur serait donc largement exagérée. Cependant, il faut bien avouer qu'une telle réserve ne pousse pas forcément à l'action, et qu'il fallut attendre celle de réformateurs beaucoup plus engagés pour que l'enseignement de la physique moderne pénètre plus profondément dans le cursus principal des étudiants en physique<sup>642</sup>. Finalement, il semble que ce qui peut être reproché à Louis de Broglie est d'avoir sous-estimé les potentialités de développements rapides des applications de la mécanique quantique au moment même où elles commençaient à prendre leur essor et de ne pas avoir mis tout son poids institutionnel au service d'une diffusion massive de la nouvelle physique dans l'enseignement supérieur.

### c) Vulgarisation et diffusion de la Mécanique ondulatoire vers le grand public cultivé

---

<sup>640</sup> *Ibid.*

<sup>641</sup> Le principal argument étant l'argument pédagogique selon lequel il faut d'abord apprendre les choses simples. Il peut également se décliner en prétendant que la physique quantique ne peut se comprendre qu'avec une très bonne base en physique classique. Ce dernier argument n'est cependant que partiellement vrai. Un bagage minimum en mécanique analytique est effectivement requis pour comprendre le formalisme de la mécanique quantique qui est essentiellement basé sur un schéma Hamiltonien. Cela dit, il n'est pas forcément nécessaire d'avoir une grande maîtrise des méthodes de résolution de problèmes de la physique classique pour aborder la physique quantique à un niveau élémentaire. Un contre-argument est qu'une initiation précoce à la physique moderne est beaucoup plus apte à éveiller l'intérêt de l'étudiant pour la discipline.

<sup>642</sup> Voir chapitre suivant.

Un autre grand aspect de l'œuvre de Louis de Broglie est son effort de vulgarisation. À travers son activité d'édition dans le cadre des *Actualités scientifiques et industrielles* chez Hermann, les articles écrits dans des journaux, les multiples ouvrages publiés et les conférences faites devant des philosophes, c'est essentiellement à travers son œuvre<sup>643</sup> que savants d'autres disciplines, philosophes (on pense ici à Meyerson, Bachelard ou encore Bergson) et grand public cultivé s'informeront des nouvelles avancées de la physique moderne. Nous passerons, pour finir ce chapitre, brièvement en revue cet aspect de son activité.

En 1927, Louis de Broglie soutient le directeur de la Maison Hermann, Enrique Freyman, dans le lancement d'une collection de publications titrée *Actualités scientifiques et industrielles*. Louis de Broglie inaugurera d'ailleurs cette série par le titre « La crise récente de l'optique ondulatoire » puis, à partir de 1933, il lancera à travers un opuscule signé Meyerson<sup>644</sup> une nouvelle sous-série (toujours dans le cadre des *Actualités*) portant sur la philosophie des sciences. Durant les premières années et à partir de 1929, une dizaine de fascicules par an seront ainsi publiés, puis la collection s'enrichira de nombreuses autres sous-séries et se développera de manière significative. Ces fascicules, souvent d'une quarantaine de pages, ont pour fonction d'assurer une présentation synthétique d'un problème actuel de la recherche scientifique de pointe à un niveau semi-technique, intermédiaire entre la vulgarisation et les publications dans les revues spécialisées. Les scientifiques qui y publiaient avaient ainsi la possibilité de présenter leur sujet de recherche à des collègues scientifiques spécialisés dans d'autres disciplines ou alors à des « amateurs éclairés ». Cette collection fut ainsi sans doute un facteur important de diffusion de la théorie quantique à d'autres cercles que celui des physiciens théoriciens et put ainsi être une source d'information primordiale pour la mise à jour des connaissances scientifiques des philosophes des sciences.

À côté de cette direction de publication, Louis de Broglie développe à partir des années 1930 un travail considérable d'écriture de vulgarisation dans lequel il insiste notamment sur les aspects épistémologiques et philosophiques de la nouvelle physique. Il fut paradoxalement en France – étant donnée l'énergie qu'il dépensera par la suite pour lutter contre ces idées – le principal diffuseur des idées de Niels Bohr et de Werner Heisenberg sur la complémentarité, la place de l'observateur dans le monde physique, et l'indéterminisme de la mécanique quantique. Dans les années 1940, il diffusa même par l'intermédiaire de ses écrits le fameux théorème de Von Neumann, qu'il croyait encore valide, et sera ainsi un des principaux avocats de la position consistant à juger improbable voire impossible un retour à une description déterministe des phénomènes physiques. Dotée de qualités littéraires indéniables, cette œuvre de vulgarisation est toutefois assez exigeante pour le lecteur. Ainsi, même lorsqu'il évite le recours à tout appareil mathématique (ce qui n'est pas systématiquement le cas), Louis de Broglie n'hésite pas à aller au fond des idées et des concepts physiques, ce qui rend la lecture de ses ouvrages malaisée pour le néophyte complet. Il n'en reste pas moins qu'ils furent appréciés par de nombreux étudiants et suscitèrent même des vocations. Maurice Lévy par exemple indique avoir choisi le métier de physicien grâce à la lecture des livres de Louis de Broglie<sup>645</sup>. Quant à Anatole Abragam, c'est en ces termes qu'il décrit ses ouvrages :

---

<sup>643</sup> À laquelle on peut ajouter celle de Langevin et celle de Bauer.

<sup>644</sup> Meyerson (1933).

<sup>645</sup> Lévy (2011).

« Il a écrit dans une belle langue limpide des ouvrages destinés à un vaste public tels que Matière et Lumière, Physique et Microphysique, Savants et Découvertes qui soutiennent la comparaison avec certains écrits de Henri Poincaré<sup>646</sup>. »

Louis de Broglie fut également co-fondateur et co-président, avec Frédéric Joliot, du Centre d'études des Mathématiques appliquées du C.N.R.S. visant à publier des monographies permettant de tenir informer les expérimentateurs des travaux de théoriciens. Il obtient le prix Kalinga de vulgarisation scientifique en 1952.

---

<sup>646</sup> Abragam (2010), p. 69.

## Chapitre IV- Les ruptures de l'après-guerre et la marginalisation d'un physicien

La quinzaine d'années qui succèdent à la seconde guerre mondiale est la période d'un bouleversement de la science française. Les moyens qui lui sont accordés augmentent considérablement, les opportunités de carrière se multiplient ainsi que les espaces scientifiques dans lesquels les exercer. Ce processus ne concerne pas uniquement la France, et est largement une conséquence des succès impressionnants des applications scientifiques obtenues notamment par les Alliés durant la seconde guerre mondiale (qu'on pense au radar et à la physique nucléaire). La prise de conscience par les gouvernants et décideurs de l'importance que peuvent avoir les applications d'une science pratiquée à grande échelle, que ce soit sur l'économie ou l'armée, a grandement facilité le travail de *lobbying* des scientifiques auprès de ces derniers. En France, ce mouvement va notamment se traduire par une augmentation très grande des moyens accordés au CNRS. En ce qui concerne la physique, et plus particulièrement la physique théorique, l'action du CNRS sera également complétée par la création du CEA, mais également – au niveau européen - par celle du CERN. Inexistantes avant la seconde guerre mondiale<sup>647</sup>, ces institutions emploieront à partir des années 1950 une grande partie des physiciens théoriciens et seront une condition nécessaire au développement de cette discipline. Dans cette ambiance de renouveau, les lieux où l'on pratique et où l'on apprend la mécanique quantique se multiplient. Le corollaire de ce développement institutionnel est la perte progressive de la place hégémonique que prenait l'IHP au sein de la physique théorique française. En particulier, Louis de Broglie va progressivement perdre, au cours de la dernière décennie de sa carrière à l'IHP, sa place centrale au sein de la physique théorique française. Ceci est bien sûr une des conséquences directes de la création de nouveaux espaces dédiés à la physique théorique, mais pas seulement. Même au sein de l'IHP, le prestige du théoricien va s'amenuiser au fur et à mesure que les incompréhensions suscitées par ses orientations scientifiques vont augmenter. Bientôt, Louis de Broglie se verra reprocher, pour diverses raisons, dans le meilleur des cas de ne pas avoir été une locomotive pour la physique théorique française, et dans le pire d'avoir été un frein, un obstacle au développement de celle-ci.

Les bouleversements institutionnels, que je décrirai d'abord dans ce chapitre, constituent donc une trame de fond sans la présentation de laquelle il est difficile de comprendre comment la marginalisation de l'héritage de Louis de Broglie et une nouvelle pratique théorique, basée sur une utilisation plus pragmatique de la mécanique quantique ont pu avoir lieu en France. En même temps, il est clair qu'ils n'épuisent pas la question, et que quelque chose en plus, lié à l'épistémologie et à la façon même de concevoir le métier de chercheur est en jeu. L'objectif de ce chapitre sera donc également de montrer, à travers une étude des pratiques quantiques françaises des quinze années qui succèdent à la guerre, que l'implantation plus large de la mécanique quantique en tant qu'outil de recherche et non plus en tant qu'objet de spéculations, ainsi que la marginalisation de Louis de Broglie résultent en outre d'un même processus de transition entre deux « régimes de production du savoir » pour reprendre l'expression de Pestre<sup>648</sup> : le passage d'un monde de scientifiques se pensant avant tout

---

<sup>647</sup> Ce n'est pas tout à fait vrai pour le C.N.R.S., qui existait sous la forme de la Caisse Nationale de Recherche Scientifique qui a rendu de très grand service à la physique, et à la physique théorique en particulier, pendant les années 1930.

<sup>648</sup> Pestre (2003).

comme des savants et des intellectuels à celui de scientifiques dont les objectifs sont aussi et surtout de résoudre des problèmes d'ordre technique. En même temps, il ne sera pas question de dire qu'il existe un déterminisme intrinsèque entre un contexte général et le devenir des individus particuliers. J'essaierai ainsi de souligner quels facteurs scientifiques, sociaux, psychologiques et politiques ont contribué à marginaliser le plus célèbre des physiciens théoriciens français du XX<sup>e</sup> siècle.

## I- Nouveau paysage de la physique française

### 1- Le phénomène international de la *big science*

La seconde guerre mondiale fut un tournant décisif dans les sciences ainsi que dans la façon de les concevoir. Premièrement, elle marqua le déplacement du centre scientifique mondial, de l'Europe aux Etats-Unis. Cette étape prend déjà son origine dans les années 1930, notamment avec l'émigration d'un nombre très important de *leaders* scientifiques européens - notamment mais pas seulement d'Europe centrale - et est actée par la démonstration de force que constitue le succès du Projet Manhattan. Ce projet démontre en même temps le genre de résultats qui peut dériver d'une coopération étroite d'un grand nombre de scientifiques entre eux et avec des ingénieurs lorsque des moyens colossaux sont mis à leur disposition. Enfin, il est la démonstration impressionnante de ce que l'Etat, et plus particulièrement l'armée, peut attendre d'un investissement dans la physique. Quelques chiffres suffisent à démontrer que les moyens accordés à la physique ont changé d'échelle, particulièrement aux Etats-Unis, à cause du tournant de la seconde guerre mondiale. Juste avant la guerre, l'Etat fédéral américain allouait une somme d'un million de dollars pour la physique. En 1952, cette somme était de 42 millions de dollars<sup>649</sup>. Pour une grande partie (98% en 1950 et 92% en 1960), l'argent fourni par le gouvernement à la science académique était d'origine militaire (venant soit du *Department of Defense*, soit de l'*Atomic Energy Commission*). Bien entendu, la principale motivation pour de tels investissements était l'espoir de nouveaux débouchés provenant de la physique nucléaire, de la physique de l'état solide ou encore de l'électronique. Mais même la physique la plus fondamentale et la plus ésotérique devait profiter de cette nouvelle générosité. Dans son livre *Quantum generations*<sup>650</sup>, Helge Kragh cite l'exemple du *Aeronautical Research Laboratories* (ARL) dans l'Ohio qui, en 1954, initia un gros programme de recherche sur la relativité générale dont les applications techniques étaient pourtant alors inexistantes. Ce programme de recherche déboucha notamment sur des conférences pour lesquelles l'ARL finançait la venue des plus grands spécialistes de la relativité générale — qu'ils viennent d'Amérique ou d'Europe — et sur des rapports dont les titres ne suggéraient vraiment pas d'étroits rapports avec des activités militaires (Helge Kragh donne deux exemples : « Quantization of Covariant Field Theory » par Peter Bergmann ou encore « Contributions to Actual Problems of General Relativity » par Pascual Jordan).

Un tel bouleversement dans les moyens ne pouvait pas manquer d'avoir un impact sur la pratique même de la recherche. En réalité, aux Etats-Unis, l'orientation de la recherche scientifique vers un opérationnalisme et un pragmatisme était déjà une tendance lourde avant la seconde guerre

---

<sup>649</sup> Ce qui correspond cependant à moitié moins si on tient compte de la valeur du dollar de 1938.

<sup>650</sup> Kragh (1999).

mondiale, comme l'a montré Sam Schweber<sup>651</sup>. Mais la « main mise » des militaires sur la science n'a pu qu'accroître cette tendance. Quoi qu'il en soit, en raison du nouveau rôle de modèle scientifique que jouaient les Etats-Unis, ce bouleversement a également touché dans une certaine mesure les pays européens comme la France et la Grande-Bretagne, avec cette fois-ci des changements de culture de recherche plus importants<sup>652</sup>. Les motivations politiques européennes n'étaient cependant pas tout à fait les mêmes. En France, et malgré la volonté de son premier haut-commissaire Frédéric Joliot de ne pas développer l'arme atomique, le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA.) créé en 1945 a très vite été un enjeu évident pour la défense nationale, bien qu'officiellement son principal objectif ait été d'abord le développement civil de l'énergie nucléaire. Mais des projets scientifiques européens à grande échelle comme le CERN n'ont pas eu cet enjeu militaire, pour la simple raison qu'il n'y avait pas d'armée européenne. Les motivations des différents acteurs, qu'ils soient scientifiques ou politiques, qu'ils viennent d'un pays ou d'un autre, étaient différentes, mais le projet fut globalement soutenu du côté politique par des individus qui avaient une forte conviction en faveur d'un projet politique européen et qui voyaient dans la mise en place de telles collaborations scientifiques une formidable étape pour initier ce processus<sup>653</sup>. Dans une moindre mesure, d'autres projets initiés avant la guerre, telle que la mise en place d'un électro-aimant dans les laboratoires de Bellevue ou les projets de création d'accélérateurs de particules par Frédéric Joliot, marquent également en France un tournant vers une science qui se construit autour d'appareillages plus lourds. Et ce genre de projets scientifiques à grande échelle nécessite une tout autre façon de travailler. D'une manière générale, ils impliquent une plus grande intégration des travaux théoriques aux recherches se déroulant autour de l'appareillage et un travail en équipe qui n'était alors jusque-là absolument pas usuel en France.

## 2- Réorganisation des institutions en France

### a) Le CNRS

Il s'agit de la première et plus grosse innovation institutionnelle de cette période, bien que ce projet remonte à bien avant la guerre. Le premier organisme créé afin de financer de manière systématique la recherche scientifique est la Caisse de recherches scientifiques, qui, destinée « à encourager la recherche plutôt qu'à récompenser la découverte », est fondée en 1901 par le sénateur Jean Audiffred. Cette caisse, qui se finance dans le privé, ne parvient toutefois pas à lever des fonds suffisamment importants pour assurer sa mission. En 1926, elle est complétée par le « Sou du laboratoire » lancé par Emile Borel, qui cette fois assure un financement public beaucoup plus important prélevé sur l'industrie<sup>654</sup>. Toutefois, aucune coordination de la science n'est encore assurée par ces organismes qui soutiennent la recherche uniquement sur le plan financier. Issu d'un projet imaginé par Jean Perrin et André Mayer, qui ne put aboutir cependant que partiellement, un nouveau financement de la recherche, ayant essentiellement pour but de fournir des bourses à des jeunes chercheurs n'ayant pas pu trouver de place au sein de l'Université, apparaît en 1930 et est pris en charge par la Caisse Nationale des Sciences, nouvellement créée et initialement prévue pour financer la retraite des chercheurs. Le premier bénéficiaire d'une de ces bourses se nomme Frédéric Joliot. Comme nous l'avons vu, la plupart des jeunes théoriciens qui émergent dans les années 1930 peuvent

---

<sup>651</sup> Schweber (1986).

<sup>652</sup> Pestre (1992).

<sup>653</sup> Voir Hermann, Krige, Mersits, Pestre (1987).

<sup>654</sup> Picard (1990).



persévérer dans cette voie uniquement grâce aux bourses de la CNS, puis à partir de 1935 de la Caisse nationale de la recherche scientifique (la CNRS), qui fusionne toutes les caisses préexistantes. En 1933, Jean Perrin parvient à obtenir la création du Conseil Supérieur de la Recherche Scientifique, organisme représentant l'ensemble de la communauté savante, constitué des plus grands scientifiques français de l'époque répartis en sections disciplinaires et dont l'objectif est de distribuer les bourses. Louis de Broglie, bien sûr, fait partie des onze membres de la section de physique. L'arrivée du Front populaire en 1936 permet de franchir une étape supplémentaire en direction d'une coordination des moyens donnés à la recherche scientifique. Perrin qui rentre en 1937 au gouvernement en tant que sous-secrétaire d'Etat à la recherche parvient avec le soutien du ministre de l'éducation nationale Jean Zay, à obtenir la création d'un Service Central de la Recherche Scientifique (SCRS) au sein de l'Education nationale. Ce service à la tête duquel est nommé le physiologiste Henri Laugier attribue aux chercheurs les différents titres (boursier, chargé, maître et directeur de recherche) et fournit aux laboratoires du matériel, des aides techniques et des crédits. Le chef du Service devient également responsable de la CNRS. Sous la pression de l'entrée en guerre, la CNRS, le SCRS, et le CSRS fusionnent avec le Centre National de Recherche Scientifique Appliqué (CNRSA, crée en 1938 pour coordonner la recherche appliquée) pour former le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), avec à sa tête Henri Laugier. L'action du CNRS va alors essentiellement servir à coordonner la recherche scientifique en vue des ses applications à la défense. Après la débâcle et l'exil de nombreux dirigeants du CNRS (dont Laugier), le régime de Vichy maintient cet organisme, en installant le géologue Charles Jacob à sa tête. La priorité du CNRS est alors le redéploiement de la recherche à des fins économiques et pratiques, notamment en renforçant les liens entre science et industrie. La science fondamentale est donc pendant cette période loin d'être favorisée, même si Louis-Leprince Ringuet obtient la création d'un laboratoire d'étude des rayons cosmiques dans le refuge du pic du Midi. Quoi qu'il en soit, la période de guerre marque une progression de l'idée selon laquelle une pratique coordonnée des sciences est possible, coordination à laquelle seront également devenus habitués les scientifiques ayant choisi de quitter la France, *via* leur participation à la *mission Rapkine*<sup>655</sup>.

Frédéric Joliot prend la tête du CNRS à la libération, avant de rejoindre celle du CEA en 1946. C'est alors Georges Teissier qui lui succède. Entre temps, Joliot met en place le comité directeur du CNRS, sorte de parlement de la recherche scientifique qui prend le relais de l'ancien CSRS. Ce comité est divisé en sections disciplinaires dans lesquelles on retrouve les scientifiques français les plus prestigieux (Louis de Broglie est nommé dans deux sections : la physique théorique et la physique corpusculaire) et dont la vocation est d'organiser la politique scientifique du CNRS.

Le CNRS possède une double fonction : celle de caisse finançant l'ensemble de la recherche scientifique du pays (soutenant notamment les différents laboratoires universitaires par l'achat de matériel et le recrutement de chercheurs), mais également celle consistant à inciter de nouvelles recherches, en créant des laboratoires *ex nihilo*. Dans certains domaines de la physique, le CNRS subira la concurrence d'autres institutions, (notamment celle du CEA dans le domaine de la physique nucléaire), et n'interviendra pas directement, en tant qu'initiatrice de nouvelles recherches, dans le développement de la physique théorique d'après guerre. En revanche, les moyens mis à disposition par

---

<sup>655</sup> Groupe de recherche français animé par Auger et Rapkine, rassemblé à Londres en août 1944 en vue de préparer le redémarrage de la recherche scientifique française après le conflit. Une de ses principales missions sera d'établir des synthèses sur les principaux travaux des Alliés poursuivis pendant la guerre. Elle sera également à l'origine de l'introduction de la pénicilline en France.

cet organisme participeront massivement au recrutement des nouveaux théoriciens. Le budget du CNRS fait plus que quadrupler entre 1944 et 1949, permettant ainsi une croissance de la science française sans précédent. Si une grande partie de cette augmentation est essentiellement destinée au budget de fonctionnement, elle permet tout de même de doubler les effectifs durant la même période. Il devient alors beaucoup plus facile pour un physicien de pouvoir espérer commencer une carrière. Par exemple, Maurice Lévy, avec simplement un Diplôme d'Etudes Supérieures en poche parvient à être recruté par le CNRS en 1945<sup>656</sup>. Quelques chiffres permettent de se représenter l'importance du CNRS dans la croissance de la physique théorique : en 1955, la section *Théories physiques* du CNRS emploie un Directeur de recherche (Alexandre Proca), 8 maîtres de recherche (équivalent CNRS de maître de conférences), 17 chargés de recherche et 45 attachés de recherche<sup>657</sup>. Les effectifs de physiciens s'occupant de physique théorique n'ont donc plus rien à voir avec ceux des années 1930, qui ne dépassaient jamais la vingtaine. D'autre part, l'un des apports du CNRS à la science française en général, et à la physique théorique en particulier, est d'avoir encouragé une politique d'ouverture de celle-ci sur l'international. Le *Bulletin analytique du CNRS*, dans lequel sont classés par discipline les travaux scientifiques publiés dans le monde entier, sera bientôt plus diffusé que le *Journal de Physique*<sup>658</sup>. Surtout, une politique d'encouragement d'échanges de chercheurs, et la mise en place, en collaboration avec la Fondation Rockefeller, d'un système de colloques organisés en France (mais dont un tiers des participants venant de l'étranger) permettront une plus grande mise en relation de la science française avec la recherche internationale. En physique, notons surtout l'organisation en 1950 par Néel d'un colloque sur le ferromagnétisme et l'antiferromagnétisme et par Auger et Proca d'un colloque sur les particules fondamentales et le noyau.

## b) Le CEA

Le Commissariat à l'Energie Atomique est créé dans l'immédiat après-guerre par le général De Gaulle sous l'impulsion de Frédéric Joliot et de Raoul Dautry, qui en seront les deux premiers dirigeants. Directement rattaché à la présidence du Conseil, le CEA se verra doté de moyens très importants, bientôt plus importants encore que ceux du CNRS<sup>659</sup>. Bien que l'objectif premier du CEA soit de mener « des recherches scientifiques et techniques en vue de l'utilisation de l'énergie nucléaire dans les domaines de la science, de l'industrie et de la défense nationale<sup>660</sup> », et soit donc *a priori* essentiellement une institution de science appliquée, une part importante de la recherche qui y sera effectuée sera de nature fondamentale. La raison en est que cette dernière était d'une importance capitale pour la maîtrise d'un domaine scientifique dont la compréhension des processus fondamentaux était encore loin d'être achevée, dans un pays comme la France qui devait rattraper son retard accumulé pendant la guerre sur les pays anglo-saxons. Ainsi, comme l'indique Jean Teillac, futur haut-commissaire à l'Energie Atomique :

« Le CEA a commencé à faire de la recherche fondamentale en 1945 pour la raison très simple que pour pouvoir faire de l'énergie nucléaire, il fallait faire de la recherche fondamentale. Rappelez-vous que les Américains avaient mis l'embargo sur tous les résultats scientifiques obtenus pendant la guerre. La première chose que Joliot a dû démarrer avec son équipe, ça a été de mesurer des sections

<sup>656</sup> Lévy (2011).

<sup>657</sup> Voir Archives de l'Académie des sciences, (Proca / Boîte 17).

<sup>658</sup> Picard (1990). Voir également D. Guthleben (2009).

<sup>659</sup> Pour une histoire du CEA, voir par exemple Hecht (2004).

<sup>660</sup> Article 1 du décret du 18 octobre 1945.

efficaces de capture des neutrons par les noyaux. De plus, le CEA s'est trouvé confronté à une masse de problèmes technologiques : construction d'appareillages, de compteurs, etc... Il y a donc eu un effort aussi bien en recherche fondamentale qu'en recherche appliquée. Par la suite, quand les éléments indispensables ont été "retrouvés" par le CEA ou lorsqu'ils ont été "libérés" par les Américains –vers 1955 - le Commissariat a continué à faire de la recherche fondamentale parce qu'il s'agissait d'une activité essentielle pour un organisme comme lui. Les développements technologiques ne peuvent se faire que s'ils sont intimement liés à la recherche fondamentale. [...] un Centre comme celui-ci a une mission qui va de l'amont (la recherche fondamentale) jusqu'à l'aval, c'est à dire l'industrialisation<sup>661</sup>. »

Une des conséquences essentielles est le fait que le CNRS, dans une grande mesure, a été contraint de déléguer la recherche en physique subatomique au profit du CEA<sup>662</sup>. À l'intérieur de son service de Physique Mathématique, dirigé par le physicien théoricien Jacques Yvon jusqu'en 1952, le CEA se dotera d'une importante équipe de physique théorique, dans lesquelles nous retrouvons des personnalités comme Albert Messiah, Anatole Abragam, Jules Horowitz, Claude Bloch ou encore Michel Trocheris. Ces physiciens organiseront à partir des années 1950 des cours de physique moderne (non sanctionnés par des examens) à partir desquels sera issu le premier véritable cours « classique » français d'introduction à la mécanique quantique (Albert Messiah)<sup>663</sup>. Messiah se remémore du contexte dans lequel ces cours ont été créés en ces termes :

« Je suis arrivé [au CEA] juste au moment où le centre de Saclay était créé ; les premiers bâtiments sortaient de terre. On a ressenti, là, le besoin de faire l'éducation des physiciens. Nous avons donc créé des cours qui étaient intitulés « Cours de physique mathématique » à cette époque, et le premier que j'ai fait étaient des cours pour normaliens, à la demande d'Yves Rocard, à l'école directeur du laboratoire de l'Ecole Normale. J'ai donné des cours au siège du CEA, à Paris. Ensuite, on arrive au gouvernement de Pierre Mendès France (juin 1954-février 1955) avec la création d'un secrétariat d'Etat à la Recherche. C'est là qu'a été donné un chapeau officiel à ces cours de physique théorique. Mon ami Claude Bloch s'est chargé de la physique nucléaire et je me suis chargé de la mécanique quantique. J'ai donc inauguré cet enseignement qui était libre et s'adressait à ceux qui ressentaient le besoin de s'initier à la physique moderne. Notre intention était de donner de fortes bases à l'ensemble des physiciens qui travaillaient à Saclay<sup>664</sup> ».

L'équipe de physique théorique du CEA ne va pas se contenter de proposer un enseignement « moderne » de mécanique quantique. Elle va également devenir une des équipes de physique théorique les plus actives de France, contribuant à faire de la physique nucléaire le premier domaine d'application de la mécanique quantique dans le pays - comme nous le verrons plus tard – et ainsi tourner la page d'une physique théorique française essentiellement portée sur les sujets abstraits.

### c) Le laboratoire de physique de l'ENS

Après les déportations successives des directeurs du laboratoire de physique, Eugène Bloch et Georges Bruhat, Yves Rocard est nommé au lendemain de la seconde guerre mondiale à la chaire de physique de l'ENS. Retrouvant à son arrivée rue Lhomond les locaux flambant neufs et démesurément

---

<sup>661</sup> Teillac (1987).

<sup>662</sup> En réalité, pas uniquement. Comme nous le verrons, ce domaine de la physique qui nous intéresse au premier chef se développera également dans le laboratoire de physique de l'ENS d'Yves Rocard et sur le nouveau campus universitaire d'Orsay.

<sup>663</sup> Qui sera le cours français de mécanique quantique de référence jusqu'à la publication du cours de Tannoudji, Diu et Laloé.

<sup>664</sup> Messiah (1984), p. 110.

grands par rapport à la réelle nécessité, il ne peut cependant que constater que le laboratoire se trouve dans une situation économique dégradée, compromettant les possibilités d'une réelle recherche scientifique. L'habileté de Rocard aidée par des concours de circonstances va cependant lui permettre de redresser cette situation en peu de temps. La première circonstance est l'aide que lui fournit en personnel son ami Maurice Ponte, alors président générale de TSF. La seconde est la récupération de matériel allemand, que la Marine française laisse à disposition du laboratoire, tout en subventionnant son entretien (le contrat passé avec la Marine aboutissait à une subvention annuelle dix fois supérieure à celle assurée par l'Education nationale pour l'entretien du laboratoire !). La troisième enfin est la récupération par Rocard, encore une fois aux frais de la Marine, du matériel de surplus de l'armée américaine, récupéré à des sommes modiques, et qui sera entassé dans le laboratoire à l'usage des étudiants de l'ENS<sup>665</sup>.

Yves Rocard<sup>666</sup> va alors brillamment initier des programmes de recherche très innovants, faisant du laboratoire de physique de l'ENS un des centres les plus actifs de la physique française. Le premier d'entre eux est la radioastronomie, qu'Yves Rocard confie à ses élèves Jean-Louis Steinberg et Jean Denisse, après avoir récupéré le matériel adéquat (deux radars allemands Wurzburg géants récupérés par les Anglais, mais laissés à la France en raison du trop faible gabarit des tunnels britanniques). Puis, il lança Claude Dugas et Pierre Aigrain dans le domaine des semi-conducteurs. Une fois initiés, le relais du CNRS lui permettait alors assez facilement de développer ces domaines entièrement nouveaux en France, en trouvant notamment de nombreux postes pour ses élèves. Cette réussite créa à son tour une croissance importante de la physique à l'ENS :

« Les promotions normales d'élèves comptaient huit à dix physiciens, mais le succès grandissant du laboratoire provoqua un plus grand nombre de vocations pour la physique, au détriment des mathématiques, qui sombraient dans le *bourbakisme*. J'eus donc vite affaire à une quinzaine d'élèves par an, qui trouvaient aisément à se caser sur le marché du travail. On cherchait des ingénieurs pour les transmissions, d'autres pour le CEA ; on parlait de lancer des programmes de fusées. L'informatique recrutait déjà. On augmenta encore les promotions de normaliens qui passèrent à une quarantaine pour les sections scientifiques<sup>667</sup>. »

D'autres domaines vont alors également être en expansion dans le laboratoire de la rue Lhomond : le pompage optique avec l'équipe de Kastler-Brossel, relativement autonome par rapport au reste du laboratoire, la résonance magnétique initiée par Pierre Grivet et Michel Soutif (qui part cependant à Grenoble rejoindre Néel en 1952) et enfin la physique théorique autour de Maurice Lévy, à qui Yves Rocard parvient à procurer en 1952 un poste de maître de recherche au CNRS, puis à la Sorbonne après son retour de Princeton.

#### d) Polytechnique

Autre Grande École dans laquelle la recherche était particulièrement atone pendant l'entre-deux-guerres, l'École Polytechnique voit un redémarrage très important de la recherche en physique dans les deux décennies qui suivent l'après-guerre. Dès la fin des années 1930, Louis Leprince-Ringuet, qui est recruté à l'X en 1936, entreprend en compagnie de son collègue Léauté de défendre la création de nouveaux laboratoires de physique au sein de l'École. Un autre souhait est que les corps et

---

<sup>665</sup> Rocard (1988).

<sup>666</sup> Voir également Pestre (1994-B)

<sup>667</sup> Rocard (1988), p. 154.

administrations alimentés par l'Ecole puisse détacher certains de leurs membres dans ces laboratoires afin qu'ils puissent pratiquer la recherche. Ces vœux aboutissent en 1938 avec un contrat établi entre Léauté et l'artillerie navale pour la poursuite de recherches sur la structure des métaux, et la mise en place d'un électro-aimant et d'une chambre de Wilson demandés par Leprince-Ringuet. En 1939, le décret Suquet demande l'affectation de 62 ingénieurs et officiers à des postes de recherche. D'Albert Messiah à Claude Bloch en passant par Jacques Friedel, ce sont beaucoup de futurs grands noms de la physique française qui ont pu faire de la recherche grâce à ce décret. Ainsi, juste avant la mobilisation, un embryon de laboratoire de physique existe à l'Ecole Polytechnique. Même si le régime de Vichy privilégie la recherche appliquée, la période d'occupation ne freine pas le démarrage de la recherche à l'X et Leprince-Ringuet réussit à obtenir des crédits pour des recherches portant sur les rayons cosmiques et la physique atomique en 1942<sup>668</sup>.

L'immédiat après-guerre voit une croissance importante de la recherche effectuée à l'X. Déjà important en 1946 (avec la présence de 20 chercheurs et 12 personnels techniques et administratifs), le laboratoire Leprince-Ringuet dispose en 1956 de plus d'une cinquantaine de chercheurs, la plupart recrutés par le *CNRS*, mais également provenant du détachement des différents corps. Également présent à l'X dans le domaine de la physique moderne, le laboratoire Vignal, qui au cours des années 1950 se spécialise sous la direction de Brachet dans l'optique électronique, l'électronique nucléaire ou encore l'étude des milieux ionisés, et sous la direction de Teissier du Cros sur la physique des solides et des semi-conducteurs.

Côté enseignement, sous la pression d'un certain nombre d'élèves frustrés de ne pas avoir accès aux théories modernes, un cours d'introduction à la mécanique quantique est dispensé par le physicien théoricien Louis Michel<sup>669</sup> à partir de 1955. Mais finalement, la plupart des théoriciens issus de Polytechnique alimenteront — au moins jusqu'à 1958 et la création par Louis Michel du Centre de Physique Théorique — davantage le CEA que les laboratoires de l'École, dans lesquels une activité essentiellement expérimentale se maintiendra.

#### e) La Faculté des sciences de Paris

Nous l'avons vu, la création du *CNRS* et du CEA a permis d'augmenter substantiellement le nombre de postes de physiciens en France. Des relations entre de nouveaux hommes forts de la physique française (Rocard, Leprince-Ringuet ou Néel) et la défense et l'industrie ont permis également d'assurer le financement de laboratoires menant des recherches novatrices. Ces bouleversements au sein de la physique française s'accompagneront bientôt également d'une réforme universitaire initiée par le colloque de Caen de 1956. Elle succède à la création d'un troisième cycle universitaire en 1954, et aboutira, pour en assurer le fonctionnement, à la création de postes de maîtres de conférences et de professeurs, ainsi qu'à la création des DEA.

Malgré la croissance scientifique incontestable qui accompagne la sortie de guerre, la situation française demeure largement en retrait de celles des autres grands pays scientifiques. Les études statistiques produites pour le colloque de Caen sont édifiantes. Le nombre de diplômés en sciences fondamentales en 1954 en France est de 1760 (soit 41 pour un million d'habitants), lorsqu'il est de 23 500 aux Etats-Unis (144 pour un million d'habitants), de 5200 en Grande-Bretagne (105 pour un

---

<sup>668</sup> Pestre (1994-A), p. 332.

<sup>669</sup> Kleman (2011).



million) et même de 2436 en Italie (51 pour un million)<sup>670</sup>. Dans ces conditions, la prise de conscience de quelques politiques, convaincus que « quelle que soit la direction vers laquelle nous tournons les yeux, l'intérêt national, tout comme la solidarité internationale, nous commandent d'accorder une priorité absolue à la recherche scientifique<sup>671</sup> », aboutit à une volonté farouche de mettre en œuvre les moyens d'une expansion drastique de la science française. Les résolutions adoptées à la séance de clôture du 3 Novembre 1956 prévoient notamment « une expansion, sans précédent, du nombre de chercheurs et de techniciens français » (avec entre autres, la volonté de décupler en dix ans le personnel de la Recherche et de l'Enseignement scientifique) et une réforme de l'enseignement supérieur scientifique (avec notamment la mise en place de l'enseignement universitaire en 3 cycles).

Le « Rapport sur la recherche fondamentale et l'enseignement scientifique supérieur », préparé par Edmond Bauer, André Lichnerowicz et Jacques Monod permet de se faire une idée des ambitions énormes qui étaient en jeu. L'accent est mis sur la nécessité de donner à l'Université une vocation particulière pour la recherche fondamentale. Pour ce faire, l'Université ne doit plus être organisée en fonction de l'enseignement secondaire, mais c'est au contraire à l'enseignement secondaire de s'adapter aux besoins de la recherche universitaire. Éviter par exemple qu'en France, comme c'est le cas encore en 1956, « on peut être licencié en physique ou sortir de l'École Polytechnique, sans avoir jamais entendu parler sérieusement de la relativité restreinte ou des éléments de la mécanique quantique, ni même de certains aspects classiques de la chimie-physique », doit devenir un impératif. Outre donc la nécessité d'augmenter drastiquement les effectifs afin de pouvoir rattraper quantitativement les pays scientifiques principaux, les auteurs mettent l'accent sur le besoin de donner une place beaucoup plus importante au sein de l'Université aux disciplines scientifiques modernes (notamment, en physique, la physique théorique, la physique atomique et moléculaire, la physique des solides et l'électronique). Pour les auteurs, les limites à une telle ambition ne résident ni « dans les besoins de la nation, largement supérieurs à tout ce que nous pourrions réaliser en dix ans », ni « dans l'effort financier nécessaire : si considérable soit-il, il constitue, sans aucun doute, par le capital national, l'investissement à long terme le plus rémunérateur possible ». Ce qui limite en revanche cette expansion est « le manque d'hommes compétents ».

Dans cet état d'esprit où règne une volonté farouche d'expansion de la science, qui sera relativement soutenue par les gouvernements successifs à partir de celui de Pierre Mendès-France, les perspectives de carrière se sont donc multipliées, à un tel point que, comme se souvient Maurice Lévy, il devenait à partir de la fin des années 1950 et surtout au cours des années 1960 extrêmement facile de faire une carrière scientifique<sup>672</sup>. L'Université a bien sûr bénéficié de cet essor.

Remarquons cependant tout d'abord que cet essor est perceptible avant ce colloque, puisqu'en 1949 le nombre de professeurs et de maître de conférences dans les Facultés des sciences françaises est de 419, et que ce même chiffre passe à 512 en 1954 et 552 en 1955<sup>673</sup>. Concernant la physique, de nombreux cours de physique moderne commencent à faire leur apparition durant la décennie qui fait suite à la guerre, grâce notamment au recrutement de proches de Louis de Broglie comme Destouches, Tonnelat ou encore Daudel. Mais le processus va s'accélérer à partir de la deuxième partie des années 1950. On peut s'en faire une idée à travers la constatation des changements de l'enseignement de physique moderne à la Sorbonne entre l'année universitaire 1956-1957 et celle de 1957-1958. Avant

---

<sup>670</sup> La France est en revanche dans la moyenne des pays cités en ce qui concerne la science appliquée. Colloque de Caen (1957).

<sup>671</sup> Mendès-France (1957), p. 32.

<sup>672</sup> Lévy (2011).

<sup>673</sup> Colloque de Caen (1957).



1957, l'essentiel des cours de physique théorique à la Sorbonne est dispensé par Louis de Broglie (*corpuscules et champs*) et ses proches (Destouches – *la quantification et la théorie fonctionnelle des corpuscules* -, Tonnelat – *Relativité* – et Daudel – *Mécanique ondulatoire appliquée*). Nous pouvons également citer la présence pendant l'année 1956-1957 de Léon Rosenfeld en tant que professeur d'échange, qui enseigne la physique théorique moderne (notamment la physique nucléaire), Nataf qui enseigne la théorie quantique des champs et la physique de l'état solide, et enfin Soleillet qui enseigne la Mécanique ondulatoire. En 1957-1958, de nombreuses personnalités font leur apparition : un enseignement complet de physique du solide moderne est donné par le trio Guiner, Aigrain et Friedel, qui deviendra bientôt le DEA (dont cet enseignement initie la formule) de physique du solide, un enseignement de physique théorique atomique et nucléaire donné par Maurice Lévy - devenu professeur à la Sorbonne - Aigrain et Brossel, alors que Messiah, Nataf et Lefebvre se joignent à l'équipe de Louis de Broglie pour assurer un enseignement de physique théorique approfondie<sup>674</sup>. Jacques Friedel se remémore :

« Ce bouillonnement, où des jeunes turcs créaient et prenaient en main un enseignement de pointe, était caractéristique de toute la physique à la Sorbonne. Presque partout, de jeunes maîtres de conférences étaient nommés, souvent avec une formation au moins partielle à l'étranger, et décidés à recréer à Paris ce qu'ils avaient connu, dans les meilleurs départements de physique, de la grande tradition de recherche universitaire<sup>675</sup> ».

Ainsi, à la fin des années 1950, le groupe de Louis de Broglie (ce dernier étant d'ailleurs alors à la toute fin de sa carrière d'enseignant à l'Université) n'a désormais plus le monopole de l'enseignement de la physique théorique à la Sorbonne. Finalement, la création de l'Université d'Orsay (à partir de 1958) achèvera de faire de l'Université française une place forte de la physique moderne.

Un changement s'initiera également dans les Universités de province, où un enseignement de physique théorique va progressivement se mettre en place (tout d'abord à Grenoble et à Strasbourg).

Au total, l'expansion de la science française, alliée à une réelle volonté de donner enfin toute sa place aux nouveaux domaines scientifiques, créent mécaniquement une multiplication des espaces dans lesquels la physique théorique va pouvoir enfin se déployer.

### 3- Les nouveaux espaces quantiques

L'augmentation conséquente du nombre de physiciens théoriciens durant la quinzaine d'années qui succèdent à la guerre a pour principale conséquence que de nouveaux espaces, dans lesquels cette discipline a enfin toute sa place, émergent. Cependant, l'Institut Henri Poincaré va rester dans un premier temps le lieu de rencontre et de rassemblement de ces physiciens. Mais la place centrale qu'occupait le séminaire de Louis de Broglie va maintenant revenir à celui d'Alexandre Proca jusqu'à la mort de celui-ci en 1955. La pratique du séminaire se généralise dans différents laboratoires (notamment le laboratoire de l'ENS ou encore au CEA). Côté enseignement, outre la création de nouveaux cours de physique moderne que nous avons déjà évoqués (ceux organisés par les physiciens du CEA et ceux créés à la Faculté des sciences), une innovation importante est réalisée au début des

<sup>674</sup> Voir le carnet de l'étudiant, Académie de Paris (1920-1960).

<sup>675</sup> Friedel (2011), p. 196.

années 1950 avec la création par Cécile Morette de l'Ecole des Houches. Côté recherche enfin, outre la création de nouvelles équipes de physique théorique dont les principales sont celle du CEA et celle de Maurice Lévy à l'ENS (puis à Orsay), on assiste également, notamment dans les laboratoires dirigés par les Joliot-Curie, à l'émergence d'un certain nombre de théoriciens travaillant dans des lieux qui étaient surtout réservés à une pratique expérimentale avant la guerre. C'est à la description de ces phénomènes et leurs conséquences que nous allons consacrer cette section.

#### a) Le séminaire d'Alexandre Proca

Comme nous l'avons vu, Alexandre Proca crée un premier séminaire au Portugal pendant la guerre<sup>676</sup>. Après avoir rejoint à la fin de la guerre Louis Rapkine à Londres, il décide, non sans hésitation, de rentrer en France, où il ne pourra malheureusement pas trouver une place au niveau qui lui semble dû<sup>677</sup>. Cependant, la création de son séminaire va lui conférer un rôle tout à fait central dans la relance des activités théoriques françaises. En créant ce séminaire, Proca a pour ambition de contribuer à combler le retard français en physique théorique par rapport aux pays étrangers. Contrairement au rapport assez lénifiant que Louis de Broglie écrit sur les activités de l'IHP en 1944, dans lequel il indique notamment que la « situation s'est beaucoup améliorée depuis une quinzaine d'années surtout grâce à la création en 1928 de l'Institut Henri Poincaré<sup>678</sup> », Proca dresse un constat sans concession sur la physique théorique française :

« On imagine mal, si on ne l'a pas connue de près, la situation de la Physique Théorique française à la fin de la guerre, et la manière dont elle était jugée à l'étranger. Il était de la plus haute importance pour nous d'élever le niveau réel des travaux, de façon à ne plus mériter les critiques qu'on nous adressait de toutes parts [...]»<sup>679</sup>.

Lancé initialement sans aucune subvention, par la seule initiative et le seul travail personnel de Proca, ce séminaire démarre pendant l'année universitaire 1946-1947 avec plus d'une vingtaine de participants. La liste des participants n'est cependant effectuée par Proca qu'à partir de l'année suivante, où le nombre s'élève alors à une quarantaine. De Jacques Prentky à Albert Messiah, en passant par Anatole Abragam, Bernard d'Espagnat et bien d'autres, presque tous les grands noms de la physique théorique française d'après-guerre y ont participé. Comme l'indique Proca, l'origine des participants est diverse :

« Les chercheurs du CNRS sont toujours venus en bon nombre, sans toutefois constituer la majorité. Les grands Laboratoires, Instituts ou Ecoles de Paris ont toujours eu des représentants au Séminaire, en nombre variable suivant les années ; dans l'ensemble, l'Ecole Polytechnique a fourni un contingent supérieur à l'Ecole Normale. Quelques ingénieurs des corps de l'Etat (Mines, Ponts et Chaussées, Poudres), spécialement détachés en vue de recherches scientifiques ont joints leurs efforts aux nôtres. Enfin, notons un certain nombre, petit mais sensiblement constant, d'étrangers venus achever à Paris leur éducation scientifique<sup>680</sup> ».

---

<sup>676</sup> Voir Passos Videiras, Santos Fitas (2007).

<sup>677</sup> Voir chapitre précédent.

<sup>678</sup> Archives de l'Académie des sciences, (42J/Boîte 40), de Broglie (1944-A).

<sup>679</sup> Voir Archives de l'Académie des sciences, (Proca/Boîte 17). Proca (1954).

<sup>680</sup> Archives de l'Académie des sciences, (Proca/Boîte 17). Proca (1954).

Conformément à la volonté initiale de Proca, ce séminaire remplira trois fonctions essentielles : premièrement, il aura vocation à initier les jeunes théoriciens français à ce qui se fait de plus récent dans la physique théorique internationale, deuxièmement, il sera un lieu d'échange et d'ouverture privilégié avec les physiciens étrangers, et troisièmement, il sera un lieu de rencontre et de stimulation pour ses participants.

Pour le premier point, certains témoignages de participants ainsi que quelques notes laissées par Proca permettent de rendre compte du contenu du séminaire. Proca décrit son fonctionnement en ces termes :

« La méthode de travail a été celle de tous les bons séminaires, à savoir l'étude en commun soit d'un problème unique pendant toute l'année, soit de diverses questions d'actualité, au fur et à mesure qu'elle pénétrait dans le cercle d'intérêt général.

Tout au début, nous avons commencé par l'Etude de l'Electrodynamique Quantique, en prenant comme base le traité de W. Heitler qui venait de paraître. L'an dernier, nous avons examiné toujours un problème unique, à savoir celui des modèles nucléaires. Cette année, nous reviendrons à l'étude de divers problèmes d'actualité dont l'étude reste indispensable à la culture générale des physiciens théoriciens<sup>681</sup> ».

Abragam indique également que l'électrodynamique quantique et la théorie quantique des champs étaient dans l'immédiat après-guerre les principales préoccupations des physiciens du séminaire : « Pratiquement tous les participants au séminaire Proca et Proca lui-même ne s'intéressaient qu'à ça<sup>682</sup> ». Ce que confirment les classements par intérêt thématique établis par Proca au début des années 1950<sup>683</sup>. Schématiquement, parmi les participants au séminaire, nous retrouvons les proches de Louis de Broglie (notamment Petiau, Fabre, Slansky, Tonnelat, Vigier) se répartir entre le thème « Mécanique quantique générale. Particules » et le thème « Relativité. Théorie unitaire ». D'un autre côté, nous retrouvons, plus nombreux, les proches de Proca (notamment Maurice Jean, Claude Marty et Jacques Prentky) investir le domaine de la théorie quantique des champs, et les physiciens travaillant notamment dans les laboratoires des Joliot-Curie investir les théories du noyau (Meyer, Nataf, Mme Benoist...). Ces physiciens prennent trop tard le train de l'électrodynamique quantique pour contribuer véritablement aux grandes avancées de la fin des années 1940 (avec notamment les travaux de Feynman, Schwinger, Dyson et Tomonaga), mais vont en revanche enfin introduire en France la pratique de la théorie quantique des champs, ainsi que les toutes nouvelles techniques de calcul quantique (graphes de Feynman, renormalisation<sup>684</sup>).

Pour le second point, Proca aura dès le début du séminaire la volonté de faire venir les physiciens étrangers de passage à Paris. Dans un premier temps, l'absence d'aide financière restreindra les possibilités, et Proca devra donc se contenter de la venue occasionnelle de ces physiciens à Paris. Il obtient cependant l'aide du CNRS lors des dernières années, ce qui permettra « d'élargir le cadre du séminaire, et [d'] essayer de le placer en quelque sorte sur un plan international, ou plutôt européen<sup>685</sup> ». Au total, le séminaire Proca sera ponctué par la venue d'un nombre assez impressionnant de grands noms de la physique théorique internationale, parmi lesquels on peut citer

---

<sup>681</sup> *Ibid.*

<sup>682</sup> Abragam (1989), p. 127.

<sup>683</sup> Archives de l'Académie des sciences, (Proca/Boîtes 18 et 19). Proca (1947-1955).

<sup>684</sup> C'est également à partir de cette période que paraît pour la première fois en France l'usage du formalisme des bras et des kets, introduit par Dirac en 1939, et qui met moins l'accent sur l'aspect ondulatoire de la mécanique quantique.

<sup>685</sup> Archives de l'Académie des sciences, (Proca/Boîte 17). Proca (1954).

Bohr, Born, Dirac, Fowler, Heitler, London, Pauli, Rosenfeld ou encore Weisskopf. Proca indique que ces physiciens ne se contentent pas de venir faire une conférence : « nous les prions systématiquement de se prêter à des entretiens privés avec les chercheurs du séminaire, car c'est plus précisément dans ces contacts que réside tout le bénéfice scientifique de leur visite ». Par ailleurs, les membres du séminaire seront partie prenante de l'organisation du colloque du CNRS organisée par Proca et Auger en 1950 : « ceux-ci ont ainsi largement profité de l'occasion qui leur était offerte de prendre contact avec les délégués de 14 pays étrangers, et d'en tirer les bénéfices escomptés<sup>686</sup> ». Au-delà du séminaire, Proca fera grandement profiter de ses réseaux internationaux les jeunes théoriciens français qui le côtoient. C'est ainsi lui qui forme les délégations françaises aux congrès internationaux de Birmingham organisé par Peierls en 1947 (dix membres du séminaire présents sur dix français), et de Glasgow en 1954 (neuf membres des séminaires présents). Il recommandera également ses étudiants pour des séjours à l'étranger, comme en témoigne cette lettre écrite par Dirac à Proca dans son style si caractéristique :

« When you wrote me about Smolett you did not say me how good he is, so I assume he is just moderately good. If he comes to Cambridge I would be glad to talk with him about his problems and give him any help with them that I can, but I might not be able to provide him with problems if he is unable to find his own<sup>687</sup> ».

A une période dans laquelle, pour des raisons diverses, de plus en plus de jeunes physiciens partent compléter leur formation pendant de longues périodes dans des laboratoires et des universités étrangers, notamment anglais et américains, Proca participe pleinement à ce processus d'ouverture de la science française sur l'international.

Mais, et c'est le troisième point, le séminaire Proca sera également le lieu privilégié dans lequel les physiciens théoriciens français se rencontreront, amorceront des études en collaboration et pourront échanger sur leurs travaux respectifs. Comme l'indique Proca, l'ambiance du séminaire, que l'on imagine plus informelle et moins protocolaire que celui de Louis de Broglie, favorisait les contacts dont découlait « une connaissance humaine proprement dite entre jeunes gens qui sont à peu près de la même génération, et qui est indispensable à l'établissement d'un climat favorable à toute coopération efficace<sup>688</sup> ». Participant à ce séminaire, André Martin confirme que tel était d'ailleurs son principal intérêt<sup>689</sup>. Le séminaire Proca disparaîtra avec son créateur en 1955, mais sa fonction de fédérateur d'un noyau dur de physiciens théoriciens français était déjà remplie.

La pratique du séminaire commence en outre à se généraliser en France durant cette période. Au sein de l'IHP, outre les séminaires de Proca et de Broglie, une dizaine de séminaires sont en place (pour la physique : sur la relativité avec Tonnelat, sur les ondes et la théorie des groupes avec Kahan<sup>690</sup>). De telles activités sont également en place à l'ENS et à Polytechnique. À Lille, Louis Michel, nommé maître de conférences en 1955 après un long périple étranger (Manchester, Copenhague et Princeton), tente également de créer un séminaire<sup>691</sup>.

#### b) L'école d'été des Houches

<sup>686</sup> *Ibid.*

<sup>687</sup> Archives de l'Académie des sciences, (Proca/dossier « correspondance »), Dirac(1953).

<sup>688</sup> Archives de l'Académie des sciences, (Proca/Boîte 17). Proca (1954).

<sup>689</sup> Martin (2011).

<sup>690</sup> Voir le carnet de l'étudiant pendant les années 1950. (Académie de Paris (1920-1960)).

<sup>691</sup> Archives de l'Académie des sciences, (Proca/Boîte 17). Michel (1955).

Une jeune Française, pas encore âgée de 30 ans, et qui est venue à la physique moins de dix ans plus tôt, crée en 1951 une école d'été dont tous les théoriciens français d'après guerre s'accordent à souligner l'importance.

Cette jeune Française, Cécile Morette, s'inscrit à la Faculté de Paris pendant l'occupation, essentiellement dans le but d'obtenir un laissez passer Caen-Paris<sup>692</sup>. Elle valide son Diplôme d'études supérieures en 1943-1944 pendant lequel elle suit, entre autre, les cours de Jean-Louis Destouches. En 1944, elle devient stagiaire au CNRS et entre en tant que secrétaire scientifique au laboratoire de Joliot où elle est chargée de lire les articles venant de l'étranger et de préparer des notes pour les cours de Joliot, dans un laboratoire où la culture théorique est encore très peu présente. Malheureusement insuffisamment formée pour accomplir sa tâche, elle parvient grâce à l'aide de Joliot à partir à Dublin rejoindre Erwin Schrödinger et Walter Heitler en tant que détachée CNRS avec traitement puis sans traitement. Seule élève de ces deux grands physiciens, elle apprend alors « le métier sur le tas », part au bout d'un an et demi à Copenhague (pendant un an), puis rejoint en 1948 Oppenheimer à Princeton. Entre temps, elle valide son doctorat en France avec une thèse portant sur les mésons pi et mu devant un jury composé entre autres de Louis de Broglie et Jean-Louis Destouches.

Aux Etats-Unis, Cécile Morette est marquée par la différence entre culture scientifique européenne (et notamment française) et américaine. Aux États-Unis, les théoriciens sont logés dans les mêmes départements que les expérimentateurs et les interactions entre étudiants et professeurs sont beaucoup plus nombreuses et informelles. Faisant la connaissance de Bryce De Witt qui devient son mari, elle décide alors de rester aux Etats-Unis. Mais se sentant investie de la mission de faire bénéficier de meilleurs enseignements les jeunes physiciens français, elle entreprend de créer en France une école d'été grâce à laquelle les étudiants pourront avoir accès à une formation intensive en physique théorique moderne. Le lieu sera une petite commune près du Mont-Blanc où des amis possèdent un terrain. Cécile Morette fait le tour des physiciens importants, Louis de Broglie et Alexandre Proca, mais surtout Louis Néel et Yves Rocard qui soutiendront son initiative, l'un en permettant à l'école d'être chapeauté institutionnellement par la Faculté des sciences de Grenoble, l'autre en envoyant systématiquement ses meilleurs élèves de l'ENS. Elle parvient sans introduction et sans rendez-vous à rencontrer Pierre Donzelot, alors directeur de l'enseignement supérieur, qui écoute son projet et lui accorde le financement qu'elle demande ! Enfin, elle bénéficiera également de l'aide de l'OTAN et de son directeur du comité scientifique, Norman Ramsey.

Le premier cours est donné en 1951 par Léon Von Hove et porte sur la mécanique quantique. En l'espace de quelques années, un nombre impressionnant de grands noms de la physique se succèdent : Wolfgang Pauli, Enrico Fermi, Walter Heitler, Rudolf Peierls, Freeman Dyson, Joe Bardeen ou encore, bien sûr, Bryce De Witt, qui se remémore :

« J'ai expliqué la mécanique quantique pas du point de vue de Schrödinger et de la fonction d'onde, mais du point de vue de Heisenberg, avec la mécanique des matrices, la mécanique quantique des matrices. Et j'avais pensé que c'était bien pour les Français d'apprendre quelque chose qui ne venait pas directement de De Broglie<sup>693</sup>. »

Le public de l'Ecole est international, bien que les Français y restent majoritaires. Le confort est très rudimentaire, ce qui favorise la création d'une certaine intimité entre étudiants mais également

---

<sup>692</sup> Morette-De Witt (2011).

<sup>693</sup> Voir l'émission télévisée « Archimède » diffusée le 30 octobre 2001 sur Arte, et dont le script est disponible sur Internet à l'adresse suivante : <http://archives.arte.tv/hebdo/archimed/20011030/ftext/sujet4.html>

avec les physiciens réputés que nous venons de nommer. Pierre-Gilles de Gennes indique par exemple :

« On était dans une situation où l'on était mélangés dans une ambiance plus internationale ou plus américaine, et très naturellement, les questions venaient.<sup>694</sup> »

Très intensifs, les cours offraient pendant les premières années une introduction complète à la physique théorique moderne, mais se sont spécialisés par la suite. Le témoignage de Philippe Nozières donne un aperçu de cette intensité :

« Ah. Ça a été le choc, le rythme n'était pas le même, non, ça a été le choc absolu. On était plongés là-dedans, on a travaillé comme des fous. On a appris en 2 mois ce qu'on aurait appris en 2 ans d'université aux Etats-Unis<sup>695</sup>. »

De Pierre-Gilles de Gennes à Claude Cohen-Tannoudji, la plupart des grands noms de la physique théorique française reconnaissent le rôle décisif de leur passage à l'Ecole des Houches. Devant le succès d'une telle entreprise, d'autres écoles d'été se formeront en France. Parmi elles, celle mise en place par Maurice Lévy et André Martin à Cargèse en Corse à la fin des années 1950.

#### c) Les laboratoires

Comme nous l'avons vu, des équipes de physique théorique se mettent en place après la seconde guerre mondiale dans de nombreux laboratoires préexistant ou venant d'être créés. Les deux principaux pôles qui se mettent en place sont le laboratoire de physique de l'ENS et le CEA. Au sein même de ces pôles, plusieurs équipes se créent et se spécialisent dans des domaines précis. Ces équipes sont quelques fois des équipes de physique théorique pure, qui sont cependant plus spécialisés que ne l'est l'Institut Henri Poincaré, et donc également beaucoup plus proches de la physique expérimentale. C'est par exemple le cas de la Section Physique Mathématique de l'équipe de la pile atomique (la future Zoé) dirigée par Jean Yvon au CEA, qui regroupe des physiciens essentiellement préoccupés par des problèmes de physique du noyau, mais également de l'équipe de physique théorique de l'ENS dirigée par Maurice Lévy et qui s'occupera essentiellement de physique des particules élémentaires.

Malgré son statut d'institution de science appliquée intégrée à une stratégie de politique énergétique et de défense, les théoriciens engagés au CEA disposent d'une assez grande liberté de recherche. Si parmi leurs premières activités on retrouve le dépouillement d'articles ayant un lien direct avec les réacteurs nucléaires (typiquement, le ralentissement des neutrons, la géométrie des réacteurs puis les accélérateurs de particules), les premiers théoriciens engagés au CEA (Aragam, Horowitz, Bloch et Trocheris, qui seront ensuite rejoint par Albert Messiah et bien d'autres) passent une grande partie de leurs activités à parfaire leur formation théorique, comme par exemple l'étude de manuels, et à la recherche, souvent vaine, de sujet intéressants<sup>696</sup>. Pour les guider, ils ne peuvent compter que sur un Francis Perrin particulièrement absent et sur Jacques Yvon, responsable de cette section de physique théorique, mais qui est lui-même un théoricien autodidacte pas forcément apte à

---

<sup>694</sup> *Ibid.*

<sup>695</sup> *Ibid.*

<sup>696</sup> Aragam (1989).



les guider. Abragam se souvient ainsi que son premier article portait sur un calcul semi-quantique sans aucun intérêt (de son propre aveu) du rayonnement émis par un électron dans un synchrotron (semi-quantique en ceci que l'électron était considéré classiquement alors que le champ électromagnétique était quantifié). Lew Kowarski insista pour que le CEA attribue des bourses d'études à l'étranger, bourses dont Horowitz, Trocheris et Abragam bénéficieront, allant ainsi compléter leur formation à l'étranger, que ce soit en Angleterre, aux Etats-Unis ou à Copenhague. De retour en France avec des compétences importantes sur des domaines de recherches variés (Abragam par exemple devient spécialiste de la résonance paramagnétique électronique puis de la résonance magnétique nucléaire), ils s'orientent ensuite sur leurs propres sujets de recherches en parallèle des travaux plus coordonnés qu'ils ont à entreprendre dans le cadre de la stratégie scientifique générale du CEA. De nombreux domaines sont alors investis : bien entendu la physique nucléaire et la physique des particules élémentaires avec entre autre Messiah, Bloch, Omnès etc..., la résonance magnétique avec Abragam qui fonde avec l'expérimentateur Ian Salomon un laboratoire consacré à ce sujet au sein même du CEA, la physique du solide avec entre autres André Herpin et Pierre-Gilles De Gennes, puis les liquides quantiques avec Claude Bloch, Roger Balian et Cirano De Dominicis<sup>697</sup>.

Nous avons déjà vu comment Yves Rocard remet à flot après la seconde guerre mondiale le laboratoire de physique de l'ENS. Nous nous concentrerons ici sur la création de l'équipe qui nous concerne essentiellement, celle de physique théorique de Maurice Lévy<sup>698</sup>. Né à Alger en 1922, Maurice Lévy hésite entre une carrière de physicien et celle de mathématicien mais penche, sous les conseils d'un de ses professeurs de mathématiques, pour la physique. Après avoir effectué une thèse soutenue en 1948 et totalement expérimentale au sein du laboratoire de physique de la Sorbonne – plus par nécessité que par goût – Lévy veut poursuivre sa carrière en tant que théoricien. Devant l'état de la physique théorique française, son objectif est d'acquérir une formation en allant à Princeton, qui est alors le centre mondial de la physique théorique. Ne se sentant cependant pas encore suffisamment préparé, il passe d'abord par Manchester auprès de Léon Rosenfeld - où il côtoie également d'autres français parmi lesquels Louis Michel - avant de s'attaquer, en 1950, au plus gros morceau que constitue Princeton. Rentrant en France en 1952 avec une lettre de soutien élogieuse de Robert Oppenheimer, et après avoir été recommandé par Cécile Morette – à laquelle Rocard avait tout d'abord pensé pour occuper ce rôle – Rocard recrute Maurice Lévy à l'ENS et lui demande de former un noyau de physiciens théoriciens. Puisant essentiellement dans le vivier que constitue l'ENS, Lévy parvient assez rapidement à constituer un groupe important :

« Cela faisait un tout : on enseignait – soit à l'Ecole Normale, soit en physique générale [à la Sorbonne] - on repérait les bons éléments, on les recrutait comme chercheur, d'abord des thèses de troisième cycle puis des thèses proprement dites, c'était un système qui fonctionnait où très vite j'ai eu une trentaine de chercheurs, et après ça, à Orsay, cela a atteint peut-être la centaine !<sup>699</sup> »

Se créent également à l'ENS des équipes dans lesquelles des théoriciens cohabitent avec des expérimentateurs, co-publient des articles ensemble quand ils ne sont pas les deux à la fois. C'est par exemple le cas dans les équipes de Kastler-Brossel sur la résonance magnétique électronique et le

---

<sup>697</sup> Voir par exemple Balian (2010).

<sup>698</sup> Lévy (2011).

<sup>699</sup> Lévy (2011).

pompage optique, de Michel Soutif pour la résonance magnétique nucléaire (jusqu'à son départ pour Grenoble en 1951), ou encore de Pierre Aigrain et Claude Dugas pour les semi-conducteurs.

Mais ces deux grosses structures ne sont pas les seules dans lesquelles la physique théorique essaime. Les laboratoires des Joliot-Curie, c'est-à-dire l'Institut du Radium et le laboratoire de chimie nucléaire du Collège de France, dans lesquels se pratiquaient jusqu'alors une physique essentiellement expérimentale, sont bientôt occupés par de nombreux théoriciens qui se spécialisent dans la physique nucléaire ou la chimie quantique. Très intégrés aux travaux expérimentaux effectués dans leur laboratoire, il n'est pas rare qu'ils publient en compagnie de leurs collègues expérimentateurs. En physique du solide, un petit groupe se crée également autour de Jacques Friedel<sup>700</sup>. De retour de Bristol, où il apprend la physique théorique du solide sous la direction d'un des plus grands spécialistes de la discipline, Philipp Mott (qui deviendra son beau-frère), il est engagé en 1956 comme maître de conférences à la Sorbonne, où il lance en compagnie de Pierre Aigrain et Daniel Guiner un DES de physique du solide et où il commence à encadrer des thèses. Après leur doctorat dans un domaine encore peu exploré, beaucoup de ces élèves se délocaliseront en province pour y monter leur propre équipe de physique du solide (comme Emile Daniel à Strasbourg), participant à un début de décentralisation scientifique. A la création du campus d'Orsay, Friedel se joindra à Aigrain et Guiner, qui pourront obtenir l'appui d'Yves Rocard pour installer un laboratoire de physique du solide dans le nouveau campus. Ils rejoindront là-bas le nouveau laboratoire de physique nucléaire dans lequel de nombreux théoriciens des anciens laboratoires Joliot-Curie ont emménagé, ainsi que le nouveau laboratoire de physique théorique créé par Maurice Lévy. Orsay devient alors un des principaux pôles de la physique (y compris théorique) française. Tout d'abord en retrait par rapport au développement de la physique théorique, l'Ecole Polytechnique recrute Louis Michel qui fonde également une équipe de physique théorique à l'X en 1958. A la fin des années 1950, la physique théorique, ainsi que l'utilisation de la mécanique quantique ont déjà essaimé dans de nombreux laboratoires de Paris et même de province (notamment à Strasbourg et à Grenoble).

Je propose ci-dessous une ébauche synthétique de la communauté quantique de France pendant les quinze années qui succèdent à la guerre. Cette ébauche a été principalement faite grâce aux renseignements fournis par le *Journal de Physique* et est sans doute loin d'être complète : de nombreux théoriciens m'ont sans doute échappé<sup>701</sup> (essentiellement parce qu'ils n'ont pas publié dans le *Journal de Physique* et qu'une revue systématique des *Comptes rendus* est très difficile à entreprendre) et je n'ai pas cherché à suivre les différents individus dans leurs mouvements entre laboratoires (je n'ai ainsi cité qu'une seule fois chaque physicien, même lorsqu'il passe d'un laboratoire à un autre, de nombreux physiciens nucléaires appartenant aux laboratoires des Joliot-Curie se retrouvent par exemple à la fin des années 1950 à Orsay). Ce recensement ne rend donc pas justice aux processus dynamiques, mais j'espère toutefois que cette ébauche donne une première idée de l'ampleur de la diffusion de la mécanique quantique dans la pratique des physiciens français dans les différents laboratoires ainsi que les domaines de la physique qu'elle sert à investir.

---

<sup>700</sup> Friedel (2011) et Friedel (1994).

<sup>701</sup> Par exemple, pour le groupe de Maurice Lévy, je suis loin d'obtenir la trentaine de noms indiqués par ce dernier.

Laboratoires	Physiciens	Sujets d'intérêts
IHP	<p>S. Slansky, G. Petiau, B. Kwall, A. Proca, K.H. Tzou, J. Winogradsky, R. Poitier, O. Costa de Beauregard.</p> <p>E. Arnous, J. Prentki, A. Visconti, B. d'Espagnat.</p> <p>O. Hittmair, M. Moshinsky.</p> <p>A. Salmona, P. Frenkiel.</p> <p>L. de Broglie, J.P. Vigier, P. Hillion, G. Lochak, F. Halbwachs, J. Andrade e Silva</p> <p><i>T. Kahan, G. Rideau</i></p> <p><i>J.L. Destouches, P. Février, F. Aeschlimann</i></p>	<p>Particules, MQ Générale.</p> <p>MQ, Relativité</p> <p>Particules, Méson, TQC.</p> <p>Particules.</p> <p>Atomes, collisions.</p> <p>Particules, Programme causal.</p> <p>Particules, TQC.</p> <p>Cadre théorique, Logique, Epistémologie.</p>
Institut du Radium	<p>R. Bouchez, P. Daudel, R. Muscart, M. Riou, M. Jean, P. Benoist-Gueutal</p> <p>R. Daudel</p> <p>G. Bertier, M. Mayot, A. Pullman, B. Pullman, S. Odier, H. Brion.</p> <p>J. Ratier</p>	<p>Noyau</p> <p>Noyau, chimie quantique.</p> <p>Chimie quantique</p> <p>Méson, TQC.</p>
Laboratoire de chimie nucléaire du collège de France	R. Nataf, C. Marty, T. Yuasa, J. Laberrigue-Frolov, G. Mouchitzky	Noyau
Laboratoire de physique atomique et moléculaire du Collège de France	Paul Kessler	Particules
Laboratoire physique théorique Collège de France	J. Laval	Solides
C.E.A.	<p>A. Abragam, A. Herpin, J. Yvon</p> <p>P.G. De Gennes, P. Lafore,</p>	Solide, magnétisme.

	J.P. Millet  M. Trocheris, J. Horowitz, A. Messiah, C. Bloch, C. Besset, C.T. de Dominicis, R. Balian, V.P. Gillet	Solide.  Noyau.
E. N.S.	M. Lévy, A. Martin, P. Meyer, L. Verlet, J. Gavoret, M. Gourdin, J. Trinh Van, B. Jancovici, B. Oquidam  M. Soutif  M. Balkanski, J. des Cloizeaux, P. André.  J. Winter, J.P. Barrat.	Particules, TQC. Particules, TQC, Noyau.  Paramagnétisme  Solide  Atome, résonance magnétique.
Ecole Polytechnique	J. Winter.  J. Heidmann  L. Michel	Superfluide  Noyau  Particules, TQC
Centre de physique des solides	J. Friedel, E. Daniel, A. Blandin	Solide
Laboratoire des recherches physiques Sorbonne	M. Larmaudie , C. Duculot, J. Vincent, J. Akriche, J. Herman	Molécules
Laboratoire Aimant Bellevue	C. Weniger  M. Rodot	Molécules  Semi-conducteur
Laboratoire des Hautes Pression Bellevue	L. Galatry, F.S. Schuller	Molécules
Laboratoire de l'infrarouge du PCB	G. Amat, M.L. Grenier-Besson	Molécules
Laboratoire de Phys. Astro. De l'obs de Paris	G. Wlerick	Semi-conducteur
Laboratoire de luminescence du PCB	D. Curie	Atomes & Molécules, Solide
Laboratoire d'électronique et de radioélectricité	Joseph Seiden	Résonance nucléaire, liquide

Laboratoire de chimie-physique de la faculté des sciences	J. Ramadier, S. Maes, Y. Héno	Molécules Particules
Laboratoires physique nucléaire d'Orsay (créé en 1956)	J. Touchard	Noyau
Ecole Supérieure de physique et chimie	J. Uebersfeld, J. Combrisson	Résonance paramagnétique
Strasbourg	S. Nikitine, S.G. El Komoss G. Munsch, P. Pluvillage.	Molécules Atomes
Grenoble	A. Marchand, Y. Ayant, B. Dreyfus, J. Peretti A. Reulos	Solide Cadre théorique
Lyon	R. Grandmontagne M.J. Huck P. Verzaux	Molécules Particules Noyaux
Dijon	L. Mariot	Solide
Marseille	G. Bodiou	Particules
Nancy	J. Barriol, J. Régnier	Molécules
Toulouse	E. Durand	Math.
Bordeaux	Ph. Salin, Y. Morel	Particules

Avant d'aller plus profondément dans l'analyse des travaux théoriques qui sont entrepris par ces physiciens (voir section suivante), je finirai ce tour d'horizon en insistant sur ce qui me paraît l'information la plus marquante que ce tableau nous permet d'acquérir. Si nous le comparons au tableau similaire que nous avons dressé pour la période 1925-1940, nous constatons, outre la spectaculaire croissance (on passe d'un effectif de moins d'une trentaine de physiciens à un effectif de plus d'une centaine !), le fait que l'IHP perd sa place hégémonique (même si elle reste importante). Avant la guerre, plus de la moitié des théoriciens français était rattachée à l'IHP, les autres étaient dispersés dans quelques laboratoires où leur activité théorique restait marginale. Pendant la quinzaine d'année qui succède à l'après-guerre, notre recensement indique que moins d'un quart des théoriciens sont rattachés à l'IHP<sup>702</sup>, et bien sûr, ce chiffre va continuer à décroître durant les années 1960. Et

<sup>702</sup> Et encore, une partie d'entre eux ne se trouvent déjà plus à l'IHP à partir de la seconde moitié des années 1950, comme Proca et Kwal qui décèdent, ou d'Espagnat et Prentki qui sont recrutés au CERN.

surtout, les physiciens qui n'appartiennent pas à l'IHP ne sont plus dispersés dans des laboratoires expérimentaux, mais forment de réelles équipes de recherche, co-écrivent ensemble des articles, participent à des séminaires (que ce soient des séminaires de laboratoire « interdisciplinaires<sup>703</sup> » comme à l'ENS ou des séminaires disciplinaires interlaboratoires comme le séminaire d'André Herpin sur la physique du solide au CEA). Du fait de leurs contacts beaucoup plus étroits avec les physiciens étrangers, qu'ils ont eu l'occasion de connaître en profondeur au cours de leurs séjours de formation aux États-Unis ou en Angleterre, du fait aussi de leur immersion dans les grands courants théoriques internationaux, ceux de la *Solide State Physics*, ceux de la résonance magnétique nucléaire, ceux de la modélisation du noyau atomique et ceux des programmes de recherche autour de la théorie quantique des champs ou de la matrice S, les physiciens qui prennent la tête de ces nouveaux laboratoires font de ceux-ci des lieux de passage privilégiés pour les étrangers en visite en France. La volonté de rendre la physique française plus internationale, et de suivre les standards de recherche anglo-saxons (avec tout ce que cela implique dans la pratique scientifique, les échanges entre collègues mais également entre professeurs et étudiants beaucoup plus étroits et informels) a d'ailleurs été tout à fait explicitée par bon nombre d'entre eux.

## II- La production des théoriciens d'après-guerre

Une autre façon de rendre compte de la plus profonde diffusion de la pratique de la mécanique quantique en France est de reprendre le genre d'études que j'ai effectuées dans une partie précédente pour le *Journal de physique* entre 1945 et 1960. Nous reprendrons ici une nouvelle fois ce genre d'approche quantitative avant d'adopter une approche plus qualitative en analysant quelques exemples typiques de travaux quantiques effectués par les principaux groupes de physiciens. Nous serons ainsi en mesure de discuter de l'écart qui se creuse entre une théorie physique pratiquée par le groupe de Louis de Broglie et celle pratiquée par la nouvelle génération.

### 1- Etude quantitative du *Journal de physique* (1945-1960)

Durant ces années, le *Journal de physique* reste avec les *CR* un des principaux modes de publication des physiciens français. Je répète ici que les *CR* représentent sans doute plus complètement la physique institutionnelle française, mais que l'analyse de ce journal est rendue presque impossible par sa présentation, et que les articles conséquents sont souvent remis au *Journal de Physique*. Cependant, même si cette attitude ne devient pas encore systématique, de plus en plus de physiciens commencent à publier dans les journaux étrangers. Ils sont, comme nous l'avons déjà remarqué, beaucoup plus insérés dans les réseaux internationaux que leurs aînés, et peuvent donc préférer publier dans des revues anglo-saxonnes afin d'atteindre une audience incomparablement plus large. Le phénomène est d'autant plus compréhensible que, outre le problème d'accessibilité de la langue française à l'étranger, la physique théorique française n'a pas une très bonne réputation, ce qui, sans doute, limite l'audience du *Journal de physique* en dehors de la France. Nous essaierons

---

<sup>703</sup> Je mets « interdisciplinaire » entre guillemets car il s'agit bien sûr exclusivement de séminaires de physiques : le séminaire de l'ENS regroupe, par exemple, les différentes équipes de physique qui travaillent sur des thèmes variés.



d'évaluer au cas par cas dans quelle mesure ce processus biaise les résultats. L'argument principal étant que la prise en compte de ce phénomène ne fait souvent qu'accentuer le poids des principales conclusions auquel on parviendrait en se contentant d'étudier le *Journal de Physique*.

Je présente ici uniquement les résultats pour les articles quantiques. Je peux cependant toucher quelques mots de la production physique en général. Les quelques éléments à retenir ici sont la croissance des travaux portant sur la physique nucléaire et plus généralement celle de la physique subatomique. En nombre, ce dernier domaine dépasse au cours de la quinzaine d'années les articles sur l'optique (que ce soit la spectroscopie atomique ou moléculaire, les propriétés optiques des corps, etc...). Nous pouvons également signaler l'apparition et le développement progressif de nouveaux domaines, parmi lesquels on retrouve notamment la résonance paramagnétique électronique, le pompage optique, la résonance magnétique nucléaire et la physique des semi-conducteurs, et plus généralement le développement de ce qui deviendra la physique du solide. Avec la physique nucléaire, ces domaines sont des champs de recherche privilégiés dans lesquels une interaction forte entre résultats expérimentaux et modélisations théoriques quantiques vont souvent de pairs. L'expansion de ces domaines de recherche constitue donc une raison importante de la nécessité de prendre enfin en compte, à toute fin pratique, la mécanique quantique, y compris pour les expérimentateurs qui abordent une nouvelle phénoménologie qui ne se décrit qu'en termes quantiques.

En ce qui concerne les travaux quantiques, je rappelle brièvement le principe d'organisation des données. Il s'agit de recenser dans le *Journal de Physique* les articles dans lesquels le formalisme de la mécanique quantique est explicitement utilisé, et de les répartir dans les différents thèmes pour lesquels il est utilisé. Chaque période étudiée correspond à trois années. La dernière colonne du tableau affiche la place relative qu'occupe ces articles par rapport au nombre d'articles total publiés dans le *Journal de Physique*.

Ces remarques préliminaires faites, voici les résultats de l'étude.

Rubriques	Sous-rubriques	1947-1949	1952-1954	1957-1959
<b>Travaux généraux sur le cadre théorique</b>	Physique Quantique	4	8	7
	Autres	0	1	0
	Total	4	<b>9</b>	<b>7</b>
<b>Travaux à visée essentiellement mathématique</b>			1	5
<b>Travaux à visée philosophique ou</b>		0	4	0

<b>épistémologique</b>				
<b>Études de la matière</b>	Solide (vibration des réseaux, électrons dans les métaux, semi&supra-conducteurs)	0	6	17
	Liquide quantique	2	0	1
	Magnétisme, résonnance magnétique dans les corps	1	3	4
	Total	3	9	22
<b>Physique atomique</b>		0	3	8
<b>Physique moléculaire</b>		0	9	6
<b>Physique du noyau</b>		5	21	6
<b>Physique des particules et de leurs interactions (physique des hautes énergies + théories des particules et des interactions)</b>	Théories générales	9	5	10
	Applications	3	7	6

<b>Total (taux d'articles quantiques par rapport à l'ensemble)</b>		24 (14%)	68 (14%)	70 (18%)
--	--	----------	----------	----------

Si l'on compare la place relative qu'occupent les travaux quantiques par rapport au total des publications du journal, on s'aperçoit qu'elle reste relativement stable durant cette quinzaine d'années (avec cependant une légère progression à la fin), et qu'elle est à peu près au niveau de ce qu'elle était en moyenne au cours des années 1930 (elle oscillait autour des 15%). Un premier élément à souligner est donc que la croissance de la production des travaux quantiques accompagne la croissance de la production totale de physique. Mais comme nous le verrons plus tard, la croissance des travaux quantiques en France est sous-estimée dans ce tableau par le fait que, à partir du milieu des années 1950, de nombreux théoriciens travaillant notamment sur la physique des particules et la physique nucléaire publient essentiellement dans des revues étrangères. Quoi qu'il en soit, cette croissance est conséquente, comme le laissait prévoir notre constatation de l'augmentation de la communauté des physiciens pendant cette période. Pour rappel, pendant les années 1930, le rythme de production des travaux théoriques quantiques culminait à 34 articles en trois ans (années 1933, 1934 et 1935) avant de diminuer jusqu'à 19 articles en autant de temps à la toute fin de la décennie. La fin de la guerre voit donc un redécollage assez lent de cette production (24 articles pour les années 1947-1949) qui accélère par la suite de manière très significative. Le point d'infléchissement peut être situé dans la première moitié des années 1950, ce qui correspond assez bien avec la mise en place des nouvelles équipes de physique théorique et le retour d'un certain nombre de théoriciens de leur séjour en Angleterre, aux Etats-Unis ou à Copenhague.

Outre la croissance importante du total des articles quantiques, les deux principales informations du tableau sont la croissance significative des articles portant sur deux domaines : la physique du solide et la physique nucléaire. Pour rappel, ces chiffres pour les années trente ne dépassaient jamais 5 (toujours pour 3 ans) pour la physique du solide (essentiellement les travaux de Brillouin) et 3 pour la physique nucléaire (souvent l'œuvre d'Elsasser ou de Goldstein). Au cours des années 1945-1960, la physique quantique du solide est le domaine qui connaît la plus régulière progression, de complètement absente au début de la période jusqu'à devenir le plus grand domaine d'application de la mécanique quantique en France à la fin de celle-ci<sup>704</sup>. Nous pouvons expliquer cette progression par la mise en place de différentes équipes : celle qui s'occupe des semi-conducteurs à l'ENS (autour de P. Aigrain, C. Dugas, on retrouve ici M. Balkanski, J. des Cloizeaux et P. André.), le groupe de Friedel (composé de lui-même et de ses doctorants, A. Blandin et E. Daniel), le groupe de A. Herpin au CEA sans oublier les groupes qui se mettent en place à Grenoble et qui s'occupent surtout du magnétisme de la matière (notamment le groupe de Michel Soutif). Mais d'autres contributeurs publient également sur ces sujets, par exemple Joseph Seiden au Laboratoire d'électronique et de radioélectricité ou encore D. Curie du Laboratoire de luminescence, pour ne citer

<sup>704</sup> Du moins, si on se réfère aux seules données du tableau. Comme nous allons tout de suite le voir, les places occupées en France par la physique nucléaire et de la physique des particules semblent ici particulièrement sous-estimées par rapport à ce qu'elles représentent réellement dans les travaux français, surtout pour la période 1957-1959.

qu'eux. Pour la physique nucléaire, la progression semble beaucoup plus chaotique : elle culmine au début des années 1950 grâce notamment aux travaux théoriques des physiciens du CEA (M. Trocheris, J. Horowitz, A. Messiah, C. Bloch), du l'Institut du radium (R. Bouchez, P. Daudel, R. Muscart, M. Riou, M. Jean, P. Benoist-Gueutal) et du laboratoire de chimie nucléaire du Collège de France (notamment R. Nataf, C. Marty). Etrangement, les travaux quantiques sur le noyau sont beaucoup plus rares à la fin des années 1950. Pour expliquer en partie ce fait, on peut avancer l'hypothèse que les physiciens en question publient d'avantage dans les journaux étrangers, et surtout dans les journaux européens *Nuclear Physics* et *Il nuovo cimento*. Et effectivement, on se rend compte que cela explique bien une partie de la « disparition » de ces travaux dans le *Journal de physique*. Pour prendre quelques exemples, Claude Bloch publie pas moins de 8 articles dans le journal *Nuclear Physics* durant la période 1957-1959 (bien qu'ils ne portent pas tous sur la physique du noyau à proprement parlé). Dans ce journal très prisé par les physiciens du CEA, Roger Balian publie également, seul ou en compagnie de Claude Bloch et de Cyrano de Dominicis. Il en est de même de certains physiciens du laboratoire de physique nucléaire d'Orsay (en particulier Claude Marty), ainsi que des physiciens qui partent pour le CERN (d'Espagnat, Omnès et Prentki). Mais ceci n'explique pas tout puisque quelques physiciens qui s'occupaient essentiellement de noyau se tournent vers d'autres sujets, comme les théories statistiques, les liquides et solides quantiques ou encore les interactions nucléaires fondamentales (on est alors dans la grande période de l'élaboration des théories de l'interaction nucléaire faible, avec notamment la découverte de la violation de la parité en 1957).

A noter que les théoriciens de l'IHP ne contribuent pas à l'expansion de ces deux domaines, en raison sans doute du fait qu'ils nécessitent une intégration plus importante avec les travaux expérimentaux pratiqués en laboratoire. En revanche, ces physiciens continuent, comme avant la guerre, à alimenter les rubriques des travaux généraux sur les cadres théoriques, sur la résolution mathématique des équations et les propriétés mathématiques des théories, et sur leur épistémologie. On retrouve toujours les travaux très abstraits de Jean-Louis Destouches, de Paulette Février, mais également de Florence Aeschlimann, seconde épouse de Destouches. Mais globalement, malgré le fait que ce type de travaux persiste durant cette période, il tend à occuper une place relative beaucoup moins importante par rapport à ce qu'elle était pendant les années 1930. Un autre champ que les physiciens de l'IHP investissent est la physique des particules et de leurs interactions (plus particulièrement la physique des mésons). On y retrouve l'école de Louis de Broglie (avec notamment Petiau qui poursuit le programme de recherche sur les particules à spin), mais également d'autres physiciens plus proches de Proca qui travaillent dans le cadre théorique de la théorie quantique des champs (en particulier E. Arnous, J. Prentki et A. Visconti). Mais c'est surtout autour de Maurice Lévy à l'ENS et ensuite à Orsay<sup>705</sup>, mais également, à partir de la fin de la décennie, au CERN (avec notamment d'Espagnat et Prentki qui seront ensuite rejoint par Omnès et A. Martin) que cette physique théorique des particules se développe parmi les théoriciens français. Dans ce domaine aussi, une partie de plus en plus grande de la production des physiciens français sera « captée » par les journaux *Nuclear Physics* et surtout *Il Nuovo Cimento*.

A noter enfin que la nouvelle équipe de Louis de Broglie apparaît ici très peu dans ce tour d'horizon. Louis de Broglie a très peu publié dans le *Journal de physique* tout au long de sa carrière, privilégiant les *Comptes rendus* (en raison peut-être de son appartenance à l'Académie des sciences). La nouvelle équipe qui se crée autour de Vigier et de Louis de Broglie publiera également pour

<sup>705</sup> Il faut préciser que l'équipe de physique théorique de l'ENS continue à exister après le départ de Maurice Lévy à Orsay.

l'essentiel dans les *Comptes rendus* (à noter que Vigier publie également dans *Physical Review* en compagnie de David Bohm et dans *Il Nuovo Cimento* en compagnie de Halbwachs et Hilion).

## 2- Analyse des travaux quantiques français

Dans cette partie, nous regarderons les articles des théoriciens français d'une manière plus qualitative. Nous nous intéresserons notamment à ce qui se fait en France dans les trois domaines dans lesquels la mécanique quantique est la plus utilisée, à savoir la physique du noyau, la physique des hautes énergies et la physique du solide. Devant le nombre d'articles qui paraissent dans ces trois domaines, ma présentation sera nécessairement partielle et se limitera à donner quelques exemples de travaux qui semblent relativement représentatifs de l'ensemble.

### a) La physique nucléaire

L'application de la mécanique quantique à l'étude de la structure du noyau débute avec la théorie de Gamow, Gurney et Condon pour expliquer la radioactivité alpha à la fin des années 1920. Mais c'est surtout à partir de 1932, avec la découverte du neutron, que les physiciens ont vraiment pu avoir une idée assez précise de la constitution du noyau pour pouvoir tenter de le modéliser de manière réaliste. Une des premières tentatives faites en ce sens est due à Walter Elsasser en 1933 : il s'agit du modèle du noyau en couches, dans lequel chaque nucléon est considéré comme une particule indépendante qui subit un potentiel nucléaire. Les neutrons et les protons obéissant au principe d'exclusion de Pauli se répartissent en couches qu'ils remplissent les uns après les autres selon la composition du noyau<sup>706</sup>. Ce modèle ne sera qu'un succès partiel (ne parvenant pas à fournir le bon nombre de neutrons par couches saturées que laissait suggérer la stabilité des noyaux possédant de 82 et 126 neutrons) et sera supplanté au cours des années 1930 par le modèle de la goutte liquide de Bohr et Wheeler - qui prend moins en considération les aspects quantiques du noyau - avant de refaire son apparition au cours des années 1950 grâce notamment aux travaux de M. G. Mayer et H. Jansen et leurs tentatives d'explication des « nombres magiques<sup>707</sup> » basées sur un perfectionnement du modèle d'Elsasser.

C'est essentiellement dans le cadre de ce modèle que s'insèrent les travaux de nombreux physiciens appartenant aux laboratoires des Joliot-Curie, par exemple ceux de Nataf et Bouchez, qui publient ensemble une série d'articles portant *Sur les transitions  $\beta$  et la structure nucléaire*<sup>708</sup>. Ce type de travaux consiste essentiellement à essayer différentes formes d'interactions entre un nucléon et le noyau, de résoudre l'équation de Schrödinger correspondante et de comparer les conséquences des

---

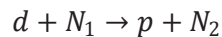
<sup>706</sup> Voir chapitre 3.

<sup>707</sup> De la même manière que les atomes possédant un nombre d'électrons qui saturent leurs couches énergétiques possèdent une grande stabilité chimique (les gaz nobles, correspondant à la dernière colonne du tableau de Mendeleïev), les noyaux possédant un certain nombre de nucléons de chaque espèce (2,8,20,28,50,82,126) sont particulièrement abondant et stable par rapport aux atomes « voisins » (en nombre de protons et de neutrons), ce qui est particulièrement bien expliqué par le modèle en couches. Le modèle de la goutte liquide, quant à lui, décrit le noyau comme un liquide composé de neutrons et de protons qui interagissent : la minimisation de l'énergie totale du liquide (comprenant par exemple les termes d'interactions coulombiennes et l'énergie de surface dû aux interactions nucléaires) permet de déduire les noyaux les plus stables. Il existe cependant un désaccord entre les deux modèles qui représentent chacun deux aspects du noyau qui doivent être pris en compte dans un modèle nucléaire plus crédible.

<sup>708</sup> Bouchez, Nataf (1952,1953).

résultats avec les données expérimentales disponibles. Dans le cas précédent, cela nécessite également l'utilisation d'une théorie de la désintégration  $\beta$  (essentiellement celle de Fermi) qui permet de calculer les probabilités des désintégrations  $\beta$  correspondant aux transitions permises. Dans ce type d'articles, l'accent est souvent mis sur le caractère opératoire des interactions choisies plutôt que sur leur caractère fondamental : il s'agit surtout de rendre compte des résultats expérimentaux, et la nature « mésonique » ou non des interactions nucléaires n'est pas questionnée.

D'autres types de travaux sur la physique nucléaire sont effectués pour obtenir par d'autres voies des renseignements sur la structure du noyau (même si la structure en couches de celui-ci est souvent implicite) : il s'agit essentiellement des calculs quantiques de section efficace entre des particules subatomiques et des noyaux. C'est le cas par exemple au début des années 1950 de Messiah et Horowitz<sup>709</sup> qui étudient théoriquement le phénomène de « stripping » en montrant comment celui-ci peut fournir des renseignements sur la structure du noyau. Le phénomène de stripping correspond à une réaction entre un deutéron (particule composée d'un neutron et d'un proton) et un noyau père, dont résultent la capture du neutron du deutéron (création du noyau fils) et la diffusion du proton, selon donc la formule :



L'idée de se servir de ce phénomène pour avoir accès aux propriétés des noyaux – explicitée initialement par S.T. Butler en 1951 - est la suivante : la distribution angulaire de la diffusion des protons dépend de manière caractéristique des valeurs des moments cinétiques des différents noyaux et de leur parité. En déterminant cette dépendance par le calcul des sections efficaces de ces processus, on peut ainsi remonter à ces propriétés des noyaux atomiques. Messiah et d'Horowitz vont essentiellement tenter de parfaire le calcul quantique de ces sections efficaces. Les calculs sont ici poussés jusqu'aux applications numériques.

Les calculs et les modèles se raffinent au cours des années, mais c'est essentiellement pour ces deux types de travaux que la mécanique quantique est utilisée en physique nucléaire en France. Pour schématiser, il s'agit d'une part d'obtenir les fonctions d'onde et les niveaux d'énergie associés aux différents modèles (donc en fonction des différentes interactions choisies) et d'autre part calculer les probabilités de transition à l'aide de plusieurs méthodes d'approximation (approximation de Born, etc...). Par rapport à l'avant-guerre, où ces types de travaux existent notamment chez Goldstein ou Elsassner, la principale différence (outre le fait évident qu'ils deviennent de plus en plus nombreux) est leur caractère collectif. Les deux travaux représentatifs que nous avons cités en exemple ont été coécrits par deux auteurs, mais il n'est désormais plus rare qu'ils soient écrits par 3, 4 voir 5 auteurs, appartenant au même laboratoire ou à des laboratoires différents.

#### b) La physique des hautes énergies

Bien que liée en principe au précédent domaine ainsi qu'à la physique des rayons cosmiques avec lesquels elle commence juste à gagner progressivement son autonomie, la physique des hautes énergies, et en particulier la physique des mésons, prend son essor au cours des années 1950. En France, deux cadres théoriques sont essentiellement utilisés au cours des années 1940 pour l'étude des particules : la mécanique ondulatoire des particules à spin, dans la droite ligne des travaux de Louis de

<sup>709</sup> Horowitz, Messiah (1953-1954).



Broglie-Petiau, et la théorie quantique des champs. C'est celle-ci qui va finir par dominer. La théorie des mésons a pour origine les travaux de Yukawa de 1935. Par analogie avec l'électrodynamique, Yukawa postule l'existence d'un champ nucléaire qui serait le responsable des interactions entre nucléons. Traduit dans le cadre de la théorie quantique des champs, cela revient à postuler l'existence d'une nouvelle particule, dont l'échange entre nucléons serait responsable de leurs interactions. Etant donnée la courte portée de l'interaction nucléaire, le nucléon ne peut avoir qu'une masse élevée, que Yukawa estime environ 200 fois plus grande que la masse de l'électron. La découverte d'une particule chargée, baptisée mésotron, dans les rayons cosmiques en 1936 sembla être la confirmation de sa théorie, mais il fut ensuite de plus en plus clair que tel n'était pas le cas, le mésotron semblant notamment ne pas être impliqué dans les réactions « fortes ». Heureusement, il fut clair en 1947 qu'une partie des manifestations attribuées au mésotron (nommée ensuite méson  $\mu$ , puis muon) était en réalité due à une particule différente, le méson  $\pi$ , qui fut un meilleur candidat pour remplir le rôle de la particule de Yukawa.

Directement impliqué dans la physique des mésons grâce à la découverte de l'équation qui porte son nom et qui fut un temps une bonne candidate à la description du champ mésonique, Alexandre Proca plaça à la sortie de la guerre ses trois protégés, Jacques Prentki, Claude Marty et Maurice Jean, sur le sujet.

Devant l'incertitude de la nature des particules en question, ces théoriciens utilisent le formalisme de la théorie quantique des champs et/ou des trous de Dirac pour modéliser les différentes possibilités d'interaction entre mésons et mésons<sup>710</sup>, ou mésons et nucléons<sup>711</sup>. Suite aux succès impressionnants de l'électrodynamique quantique à la fin des années 1940, avec notamment les travaux de Feynman, Dyson, Tomonaga et Schwinger, les physiciens disposaient, de plus, d'un modèle de théorie quantique des champs qu'il ne restait plus, selon les prévisions les plus optimistes, qu'à adapter aux interactions nucléons-mésons. C'est ce que tentent de faire Jacques Prentki et Maurice Jean en 1950, en appliquant les nouveaux formalismes de la théorie quantique des champs aux calculs de sections efficaces de diffusion nucléon-nucléon en choisissant un champ mésonique pseudo-scalaire<sup>712</sup>. Devant la multiplication des découvertes des nouvelles particules, il devint cependant évident que les théories fondamentales des interactions nucléaires ne pouvaient pas être établies aussi simplement.

Bien qu'il y ait un lien intellectuel évident entre les théories quantiques des particules et de leurs interactions, telles qu'elles étaient développées à la fin des années 1920 et pendant les années 1930 par Dirac, Heisenberg, Pauli et quelques autres, et celles qui le sont à partir des années 1950, les données ont entre-temps particulièrement changé en ce qui concerne la nécessité pour les théoriciens de suivre l'actualité des recherches expérimentales. Les théoriciens des années 1930 pouvaient, dans une certaine mesure, s'appuyer sur des données relativement stables. La base empirique à partir de laquelle pouvait débiter leur travail théorique était dans une large mesure connue de longue date. C'est particulièrement vrai en ce qui concerne l'électrodynamique quantique. La découverte la plus notable dans ce domaine, la découverte du positron, a même été précédée par son anticipation théorique. Ceci est moins vrai en ce qui concerne les interactions nucléaires, mais le rythme des

---

<sup>710</sup> Marty, Prentki (1948).

<sup>711</sup> Marty, Prentki (1949).

<sup>712</sup> Jean, Prentki (1950).

découvertes expérimentales n'était cependant pas difficile à tenir du point de vue des théoriciens<sup>713</sup>. Ceci pouvait perdurer uniquement jusqu'à ce que la zoologie de ces particules ne commence à prendre de l'ampleur, comme c'est le cas à partir des années 1950 (une centaine de particules sont répertoriées au début des années 1960). Devant l'extrême rapidité à laquelle les nouvelles découvertes expérimentales reconfiguraient les données empiriques, les théoriciens ont du jongler avec beaucoup plus de paramètres, notamment les charges, les spins, les modes d'interactions et de désintégrations et les durées de vie de ces particules. On est ainsi passé d'une « ontologie » relativement stable (proton, électron, avec de temps en temps un nouveau venu qui complète la famille, comme le neutron, le positron dont les propriétés ont très vite été identifiées) à une ontologie pléthorique. Le travail qu'ont dû réaliser les physiciens des hautes énergies durant cette période n'est pas sans rappeler celui entrepris par les chimistes lors de la classification des éléments. La différence principale étant que cette classification a ici été permise grâce à l'utilisation de raisonnements théoriques hautement sophistiqués impliquant les symétries des lois de la physique et l'introduction de nouveaux nombres quantiques (Gell-Mann introduit « l'étrangeté » en 1954). Il est donc clair que ce domaine de recherche a été particulièrement propice à l'établissement d'un contact entre théories et expériences. Il devint notamment impératif que les théoriciens participent aux discussions sur l'élaboration des accélérateurs, ne serait-ce que parce qu'eux seuls ont des idées précises sur le type d'expérience à réaliser dans le but de confirmer les théories. Les années 1950 marquent en effet également un tournant pour les expérimentateurs en raison du fait qu'il devient de plus en plus évident que l'étude des rayons cosmiques ne suffit plus à étudier systématiquement ces nouvelles particules et qu'il devient nécessaire de les produire de façon contrôlée en laboratoire.

Les travaux des théoriciens dans cette physique des particules naissante consistent essentiellement à dégager les Lagrangiens des différents champs quantiques, et à calculer des sections efficaces qui peuvent ensuite être comparées avec les données expérimentales issues des expériences de rayons cosmiques puis des accélérateurs. De nouveaux outils conceptuels sont pleinement intégrés par les théoriciens français : les graphes de Feynman, la technique de la renormalisation et l'utilisation des symétries. Dans la deuxième partie des années 1950, la découverte de la non-conservation de la parité occupera un grand nombre d'entre eux. A noter également qu'une description fondamentale n'est pas toujours recherchée. Dans bien des cas, il s'agit de poser des interactions « effectives » qui colleront le mieux possible aux résultats expérimentaux. Enfin, cette décennie voit l'apparition des outils numériques de calculs permettant de faciliter l'obtention des résultats numériques. Un exemple typique de ces deux points peut être illustré par le résumé de l'article des théoriciens de l'ENS, M. Gourdin, B. Jancovici et L. Verlet :

« Les sections efficaces nucléon-antinucleon ont été calculées à 167 Mev avec deux modèles à puits de potentiel complexe. On a d'abord étudié des puits complexes de Yukawa, dans l'approximation de Born. Un potentiel semi-théorique a ensuite été analysé par l'Ordinateur électronique IBM 704<sup>714</sup> ».

De plus en plus, donc, une recherche d'efficacité est prioritaire. La physique théorique des particules doit se coordonner autour des résultats expérimentaux obtenus ou obtenables au sein des accélérateurs. Cela est évident lorsqu'il s'agit de modèles phénoménologiques, mais c'est également

<sup>713</sup> Je ne parle pas ici des théoriciens qui s'occupent plus particulièrement du noyau atomique.

<sup>714</sup> Gourdin, Jancovici, Verdet (1958).

vrai même lorsqu'il s'agit de théories fondamentales. Dans un entretien accordé à Olival Freire, d'Espagnat indique par exemple que même si lui et son collègue John Bell s'intéressaient depuis le début de leur carrière aux problèmes d'interprétation, ils se sentaient avant tout le devoir de faire de la physique « normale », « comme tout le monde », en travaillant sur la vérification expérimentale des théories, en discutant avec les expérimentateurs. C'est dans un premier temps « sous le manteau » qu'ils commençaient à travailler sur des problèmes de fondement<sup>715</sup>. Autrement dit, les normes de ce qui constitue désormais « faire de la physique théorique normale » sont très différentes de celles qui régnaient en France dans les années 1930. En anticipant la suite, d'après ces normes, la physique théorique telle que pratiquée par Louis de Broglie et ses élèves n'est plus une « physique théorique normale ».

### c) La physique du solide

Les premières applications de la mécanique quantique à la description des métaux se fait rapidement après l'élaboration de cette théorie. Il s'agit alors avant tout de décrire le comportement des électrons en les considérant comme libres au sein de ces matériaux. Avant l'émergence de la mécanique quantique, des théories basées sur l'électrodynamique classique (celles par exemple de Drude, de Bohr ou de Lorentz), et qui avaient essentiellement pour objectif de rendre compte des propriétés électriques et thermodynamiques, avaient été proposées en rencontrant un certain succès mais souffraient d'évidentes insuffisances. Pauli, avec sa théorie du paramagnétisme, est le premier à appliquer la théorie quantique à ce genre de problèmes. Dès la fin des années 1920, Félix Bloch, un étudiant de Heisenberg à Leipzig, introduit dans sa thèse de doctorat la théorie des bandes. Les théories quantiques des électrons dans les métaux vont ainsi se développer principalement dans un premier temps dans les villes germanophones telles que Leipzig (autour de Heisenberg), Munich (autour de Sommerfeld) et Zurich (autour de Pauli) avant de se propager dans les années 1930, notamment aux Etats-Unis à Princeton autour de Wigner et Seitz et au MIT autour de John Slater, mais également en Angleterre à Bristol autour de Nevill Mott<sup>716</sup>. En 1940, Frederick Seitz écrit le premier livre proposant une mise au point complète et unifiée de ce qu'il revient désormais d'appeler « la théorie moderne des solides<sup>717</sup> ». En 1937, dans un article paru dans le *Journal of Applied Physics*, Seitz avait déjà insisté sur le regard unifié que l'on pouvait désormais porter sur ce qui se révélait comme une discipline naissante, structurée autour de la mécanique quantique<sup>718</sup>.

Bien qu'apportant d'importantes contributions théoriques grâce aux travaux de Léon Brillouin, la France restera en retrait de ces développements jusqu'après la seconde guerre mondiale, et ce malgré l'existence du groupe de physiciens travaillant sur le magnétisme à Strasbourg, qui ne prend pas en compte la mécanique quantique.

Développées initialement par des modèles très idéaux, les théories quantiques des solides vont se raffiner, notamment à partir des travaux sur la semi-conductivité d'Alan Wilson en 1931, et devenir un domaine caractérisé par une grande intégration entre expérience et théorie. Après n'avoir intéressé que modérément les physiciens durant les années 1930, les semi-conducteurs vont être l'objet d'un regain d'attention pendant la seconde guerre mondiale en raison notamment de l'importance du

<sup>715</sup> D'Espagnat (2001).

<sup>716</sup> Pour une histoire de la physique du solide, voir Lillian Hoddeson et *al.*(1992). Voir également Mehra, Rechenberg (2001), pp. 837-898, pour ce qui est de l'aspect théorique.

<sup>717</sup> Seitz (1940).

<sup>718</sup> Weart (1992), p. 628.

silicium et du germanium dans les détecteurs radars. Mais c'est la mise au point du transistor en 1947 qui achève de donner aux semi-conducteurs une place importante dans les recherches physiques. Grâce notamment à Yves Rocard et son étudiant Claude Dugas, l'étude des semi-conducteurs a pu être assez tôt introduite en France. Lancé dans ce domaine à la suggestion de Rocard<sup>719</sup>, Dugas traduit en Français le livre de Seitz et part à Pittsburgh compléter sa formation auprès de ce dernier. Il y fait la connaissance d'un autre Français, Pierre Aigrain, qu'il recommande chaudement à Yves Rocard. Ces deux physiciens développeront alors à leur retour une équipe de recherche sur les semi-conducteurs au laboratoire de physique de l'ENS. Les travaux théoriques de cette équipe pendant les années 1950 sont représentés dans le *Journal de Physique* par les articles de M. Balkanski, J. des Cloizeaux et P. André. En réalité, bien que ce groupe soit constitué d'expérimentateurs et de théoriciens, la mécanique quantique est intégrée par tous. Claude Aigrain fait par exemple un exposé sur les applications de la mécanique quantique au solide dans le séminaire Louis de Broglie en 1956 et raisonne quotidiennement à l'aide d'arguments quantiques<sup>720</sup>. Pour le travail purement théorique, il s'agit essentiellement d'améliorer le modèle des bandes en tenant compte des résultats expérimentaux (par exemple déformation des bandes d'énergie par la présence d'impuretés<sup>721</sup>, ou encore existence de niveaux d'énergie intermédiaires entre la bande de valence et la bande conductrice, pouvant être interprétée par le concept « d'exciton<sup>722</sup> »). Souvent, il s'agit d'ajouter, dans l'équation de Schrödinger représentant un modèle idéal, des termes de perturbations représentant les impuretés ou les raffinements du modèle.

Autres spécialistes des électrons dans les solides, J. Friedel et ses élèves A. Blandin et E. Daniel se préoccupent essentiellement des métaux, et notamment des alliages. Ici également, il s'agit surtout de résoudre des problèmes de perturbations introduites par la présence de noyaux atomiques différents dans la matrice cristalline du métal. Les propriétés magnétiques des métaux sont aussi investies dans leurs travaux. Ces types de travaux sont également explorés au CEA, notamment autour de P.G. De Gennes.

Globalement les études des propriétés de conductivité ou des propriétés magnétiques des solides sont largement dominantes mais un autre type de travaux sur la physique des solides concerne la dynamique des réseaux cristallins. Ceux-ci sont au niveau microscopique régis par les interactions entre les ions qui siègent dans les nœuds des réseaux. Plusieurs forces (bien que toutes ont fondamentalement une origine électrodynamique) interviennent dans ces interactions, de la plus classique interaction coulombienne aux énergies d'échange électronique d'origine purement quantique. Plusieurs approches sont possibles. L'une consiste essentiellement à modéliser les interactions de manière classique, en utilisant des potentiels phénoménologiques (comme les forces de van der Waals) : c'est essentiellement le cas de Jean Laval au Collège de France qui utilise très rarement la mécanique quantique. Une autre approche, par exemple celle adoptée par A. Herpin<sup>723</sup> du CEA, consiste quant à elle à modéliser ces interactions de manière quantique, en partant des fonctions d'onde des ions ou des atomes libres et en traitant les interactions comme des perturbations.

Même si la France ne parvient pas à concurrencer les Etats-Unis et la Grande-Bretagne dans ces champs de recherche, elle occupe à la fin de la quinzaine d'année étudiée une position tout à fait

---

<sup>719</sup> Rocard (1988), p. 150.

<sup>720</sup> Pour une description de ce groupe, voir Bantigny, Baruch (2002).

<sup>721</sup> Des Cloizeaux (1955).

<sup>722</sup> Balkanski (1958).

<sup>723</sup> Herpin (1953).

respectable au niveau de la recherche internationale : en 1961, les Français écrivent un dixième de la production internationale d'articles en physique du solide, ce qui les place en compagnie de l'Allemagne à la quatrième position internationale, même s'ils demeurent encore distancés par leurs collègues américains, britanniques et japonais<sup>724</sup>.

### **III- La marginalisation de Louis de Broglie**

Dans le contexte d'une nouvelle physique théorique qui se met en place en France essentiellement autour des trois thèmes que nous avons ci-dessus présentés, Louis de Broglie emprunte à partir de 1951-1952 un tournant singulier. Le fait de rouvrir le débat sur l'interprétation de la mécanique quantique au moment même où elle se diffuse massivement en France en tant qu'outil théorique nécessaire à la résolution des problèmes concrets que se posent les physiciens a pu paraître agir à contretemps pour beaucoup de physiciens de la nouvelle génération. La personnalité de Jean-Pierre Vigier, figure principale de la nouvelle équipe « de Broglie » n'a également pas contribué à crédibiliser une démarche qui pouvait être critiquée non seulement sur le plan de l'adéquation théorique mais également et surtout sur le plan de l'utilité. Mais outre les raisons scientifiques, d'autres facteurs ont poussé à ternir le prestige du seul prix Nobel français quant à son rôle dans le développement de la mécanique quantique en France.

#### **1- Hétérodoxies scientifiques**

Nous avons examiné lors du chapitre 3 le rôle qu'a concrètement joué Louis de Broglie dans la diffusion de la mécanique quantique en France et avons ainsi pu constater qu'un certain nombre de physiciens démarrant leur carrière autour de la période de la seconde guerre mondiale avaient quelques raisons de ne pas être satisfait de son héritage. Rappelons brièvement les griefs qui lui furent reprochés : absence de mise en contact des théoriciens français avec l'étranger, enseignement de mauvaise qualité, aide institutionnelle apportée à Destouches au détriment de Proca, et orientation de la physique théorique française dans des directions jugées improductives. En ce qui concerne l'évaluation de l'œuvre purement scientifique de Broglie, ces physiciens n'en font que très rarement mention, ou simplement pour indiquer que Louis de Broglie n'a finalement pas fait grand-chose d'autre que sa thèse de doctorat sur le plan de la contribution à la recherche théorique. Pire encore, les deux principales convictions physiques qui semblent structurer sa carrière scientifique vont à contre-courant de ce qui est majoritairement admis par ces physiciens. La première est l'attribution par de Broglie d'une masse non nulle au photon. La seconde, sans doute beaucoup plus importante, est l'idée selon laquelle le futur de la microphysique passe par un retour à une conception causale de la physique. Je propose ici de décrire ces deux hétérodoxies scientifiques et d'évaluer leurs conséquences en ce qui concerne le processus de marginalisation intellectuelle que connaît Louis de Broglie à partir des années 1950.

##### **a) La masse du photon**

---

<sup>724</sup> Kragh (1999), p. 375

Le fait d'attribuer une masse au photon amènera Louis de Broglie à poser en 1934, dans le cadre de sa mécanique ondulatoire du photon, des équations de Maxwell avec des termes supplémentaires, les termes de masse. Ceci lui permettra d'écrire des équations tout à fait équivalentes aux équations de Proca (1936) sur le plan formel, deux ans avant lui. Bien que Louis de Broglie n'a jamais revendiqué à l'écrit de manière explicite la paternité de ces équations<sup>725</sup>, cet épisode participe de la dramaturgie qui entoure les supposés liens de rivalités qu'auraient entretenus de Broglie et Proca, et dont la portée symbolique semble aller au-delà de ces deux personnes, l'un représentant l'ancienne école théorique française repliée sur elle-même, l'autre l'école théorique moderne internationaliste. Nous reviendrons plus bas brièvement sur ce point.

Mais ce qui nous intéresse ici est le contenu de cette idée, et la manière dont elle pouvait être perçue dans le contexte d'après-guerre et du succès de l'électrodynamique quantique. L'attribution d'une masse au photon rompt l'invariance de jauge de la théorie. Ceci possède une grande importance étant donnée la place prise par les symétries de jauge dans la physique des particules qui se développe après la seconde guerre mondiale : au même titre que le principe de relativité restreinte, l'invariance de jauge se révélera être un des piliers du modèle standard des particules, chantier dont l'électrodynamique quantique est la première réalisation. La symétrie de jauge se révèle effectivement cruciale pour la mise en œuvre de la procédure de renormalisation. La rejeter revient donc à remettre en cause la renormalisabilité de l'électrodynamique. D'autre part, la contrainte d'invariance de jauge jouera un important rôle heuristique dans le développement des théories des interactions faibles et fortes. Louis de Broglie qui continuera à croire, en compagnie de Jean-Pierre Vigier et jusqu'à la fin de sa vie, à l'existence de la masse du photon, sera donc en cela très singulier au sein de la physique théorique de l'après-guerre.

#### b) L'interprétation causale de la mécanique quantique

Les objections qu'on peut porter à Louis de Broglie sur le point précédent manqueront leur cible puisque celui-ci n'adhèrera jamais au programme de la renormalisation. Ceci est en relation avec ce qui constitue la plus grande hétérodoxie de Broglienne : ce n'est pas seulement l'électrodynamique quantique standard qu'il réinterroge à partir des années 1950, mais bien le cadre théorique entier dans lequel elle s'exprime, à savoir la mécanique quantique dans son ensemble, ou plus précisément, son interprétation usuelle. J'ai déjà indiqué les raisons qui ont poussé Louis de Broglie à effectuer ce changement d'orientation et je n'y reviendrai pas. Cependant, avec une mécanique quantique qui va de l'avant, ce tournant ne peut manquer d'interroger des physiciens au tempérament plus pragmatique. Comme l'a honnêtement reconnu Georges Lochak :

« Dans l'enthousiasme d'après-guerre, alimenté dans le monde scientifique par le développement et les applications de la physique nucléaire, la naissance de la physique des particules, la construction des premiers accélérateurs et la percée fulgurante de la théorie quantique des champs, le moins que l'on puisse dire est que le moment était mal venu de s'interroger, comme le faisait de Broglie, sur le sens et sur l'avenir de la mécanique quantique. [...] Il m'a raconté, à ce propos, comment jadis, à l'époque où la théorie engrangeait succès sur succès, tout le monde était plus qu'émerveillé, presque incrédule, devant les preuves répétées de ses capacités heuristiques qui

---

<sup>725</sup> Louis de Broglie parlait lui-même d'« équation de Proca » dans ses écrits, même s'il faisait quelques fois le lien avec sa propre théorie du photon.



semblaient faire miracle. A chaque nouveau coup d'audace, beaucoup se disaient : « Cette fois, c'en est trop », mais chaque fois, le résultat était le bon<sup>726</sup> ».

Si c'est sans doute l'idée même de rouvrir le débat de l'interprétation à un moment où la mécanique quantique en tant qu'outil de travail rend les plus grands services aux physiciens, la conviction partagée par le plus grand nombre est que, même si la question de l'interprétation devait se rouvrir, cela ne serait pas au profit des idées de Louis de Broglie. Maurice Lévy eut par exemple, par presse interposée puis par correspondance directe un débat avec Louis de Broglie à ce sujet, et dans lequel il déclarait notamment :

« Il faut noter aussi que l'évolution des théories physiques s'effectue, en général, par la nécessité d'expliquer des phénomènes nouveaux incompréhensibles sur la base des théories admises précédemment. Or non seulement les tenants de l'interprétation déterministe n'ont fait aucun effort dans ce sens, mais encore on voit mal comment une solution aux difficultés présentes de la théorie quantique relativiste pourrait être obtenue par le maintien du déterminisme en microphysique. [...] Il serait faux d'imaginer que le courant déterministe a fait beaucoup d'adeptes dans le monde. En U.R.S.S., où cette interprétation avait semblé s'imposer officiellement aux beaux jours du stalinisme, un voyage effectué l'an dernier nous a permis de constater qu'elle était maintenant abandonnée par la grande majorité des physiciens, à deux ou trois exceptions près. Aux U.S.A. David Bohm n'a jamais été suivi. En pratique, la plupart des physiciens ont adopté sur cette question une attitude essentiellement pragmatique et sceptique. Nullement hostiles, sur le plan philosophique, à l'une ou l'autre position, ils attendent d'une théorie qu'elle fasse ses preuves, soit par les résultats auxquels elle parvient, soit par sa fécondité en tant qu'instrument de travail (possibilité de suggérer des expériences nouvelles, par exemple.)<sup>727</sup> »

Or, ce dernier contrat, plus que jamais au premier plan des priorités de la grande majorité des physiciens d'après-guerre ne sera jamais rempli par le « programme causal » de Louis de Broglie-Jean-Pierre Vigier.

## 2- Un nouvel entourage

L'attitude de Louis de Broglie n'a jamais cependant été de chercher l'affrontement avec les tenants de l'interprétation « orthodoxe », comme l'illustre la cordialité des lettres échangées entre lui et Maurice Lévy<sup>728</sup>. Tel n'est cependant pas le cas de l'attitude de Jean-Pierre Vigier, beaucoup plus militante et engagée que celle plus prudente et réservée de Louis de Broglie. Ce même Vigier répond à Maurice Lévy dans le Monde :

---

<sup>726</sup> Lochak (1992), pp. 191-192.

<sup>727</sup> Archives de l'Académie des sciences, (42J/Boîte 26), Lévy (1957).

Le débat (qui restera amical) entre Lévy et de Broglie s'est ouvert lorsque le Père Dubarle écrit un article dans le journal du monde du 10 janvier 1957 intitulée « Le dossier récent du déterminisme ». En désaccord profond avec nombre des conclusions de l'auteur, Maurice Lévy décide de répondre à l'article par la lettre à la rédaction que je cite ci-dessus et qu'il envoie, par courtoisie, en copie à Louis de Broglie (puisque'il y est question).

<sup>728</sup> Louis de Broglie y renouvelle même à Maurice Lévy son invitation à se rendre à son séminaire afin de faire un compte rendu sur « les conséquences physiques de la non-conservation de la parité dans les interactions faibles ». Archives de l'Académie des sciences, (42J/Boîte 26), de Broglie (1957).

« Je voudrais du reste, faire remarquer que la valeur d'une théorie ne se mesure pas au nombre de ses partisans (sur la base d'un tel critère, les partisans de l'atomisme au siècle dernier avaient tort face à l'école énergétique)<sup>729</sup> ».

C'est essentiellement Jean-Pierre Vigier qui va être à l'origine de la composition du groupe d'élèves qui va entourer Louis de Broglie dans la dernière phase de sa carrière, bien que le noyau d'élèves qui deviendra le plus proche de Louis de Broglie va avoir tendance à prendre ses distances par rapport à lui. Les prises de position hétérodoxes semblent être une constante dans la carrière de Vigier. A côté des problèmes d'interprétation de la mécanique quantique, il interviendra dans la controverse de la fusion froide de 1989, en plaidant en faveur de la réalité du phénomène. Il sera également un fervent défenseur de la masse du photon, dont il cherchera des traces dans les travaux des astrophysiciens (phénomène de vieillissement de la lumière provenant des objets célestes) et qu'il mettra en relation avec une critique de la théorie traditionnelle du Big Bang<sup>730</sup>. Engagé idéologiquement et politiquement du côté du Marxisme, il sera membre du PCF avant d'en être exclu pour dissonance au moment des événements de mai 1968. Il luttera enfin avec véhémence contre « l'idéalisme » de l'interprétation de Copenhague, et sera très engagé dans la défense du rationalisme en science<sup>731</sup>. François Lurçat décrit ainsi Vigier :

« [...] c'était un type qui faisait de la physique comme un militant, pas comme un scientifique, et il a voulu accrocher son wagon lui aussi à la gloire passée de de Broglie [...]. Et en plus, c'était un type qui avait un pouvoir de conviction extraordinaire, il avait une personnalité très puissante, un peu comme un chef de parti politique qui fait des discours et qui enthousiasme ».

Lochak, quant à lui, se remémore de la violence avec laquelle Vigier avait pris à partie Heisenberg lui-même lors d'un colloque<sup>732</sup>. Nous pouvons aujourd'hui nous faire une idée de son ardeur au débat dans un certain nombre de compte rendu de colloque<sup>733</sup>. Reste que, comme le reconnaît Lochak, et même s'il ne s'agit certainement pas d'un point fondamental, cette personnalité qui a permis à Louis de Broglie d'être entouré d'un nombre de physiciens presque exclusivement communistes<sup>734</sup>, n'a également pas forcément aidé, par ses excès de conduite, à crédibiliser la démarche de ceux qui étaient engagés dans le programme causal<sup>735</sup>.

Outre Vigier, la nouvelle équipe ainsi formée a pour noyau dur Georges Lochak, Francis Fer, Andrade e Silva, Mumm Thiounn, Francis Halbwachs et Pierre Hillion, ainsi que quelques autres physiciens, dont des étrangers, qui gravitent occasionnellement autour du groupe. Lochak indique :

---

<sup>729</sup> Lettre de Jean-Pierre Vigier la rédaction du journal *Le Monde*, le 7 mars 1957. Archives de l'Académie des sciences, (42J/Boîte 26).

<sup>730</sup> Pecker (1991).

<sup>731</sup> Il interviendra dans le fameux colloque de Cordoue en 1979 pour y défendre la position matérialiste et interviendra également dans la controverse suscitée par les supposés dons parapsychologique de Jean-Pierre Girard.

<sup>732</sup> Lochak (2011).

<sup>733</sup> Voir Colloque de Cordoue (1980) ou Korner (1957).

<sup>734</sup> Ce qui ne manque pas de sel lorsque l'on pense à la réputation de conservateur de Louis de Broglie, et même à la suspicion de sympathie pour le régime de Vichy. Nous y reviendrons.

<sup>735</sup> D'un point de vue très général, on peut remarquer que beaucoup de physiciens parmi les plus proches de Louis de Broglie ont une réputation assez sulfureuse. Outre Vigier, nous avons déjà examiné le cas de Destouches, et nous pouvons ajouter le cas d'Olivier Costa de Beauregard, qui s'illustra par ses thèses sur les phénomènes parapsychologiques.

« Tous les membres de la jeune génération avait peu ou prou, quand je repasse le film de ma mémoire, un parfum de marginalité, que ce fût par goût, par origine, par un hasard du destin, ou par simple fait d'avoir rejoint de Broglie à ce moment là<sup>736</sup> »

Maurice Kleman, qui fréquenta un (court) moment ce groupe, confirme cet aspect des choses en indiquant que c'est en partie cela qui l'a motivé à les rejoindre :

« J'étais un peu attiré par ce genre de théories, mais de très loin. Je ne savais même pas vraiment de quoi il s'agissait, mais comme ils faisaient scandale...<sup>737</sup> ».

Les anciens élèves, quant à eux, accueillent avec perplexité la nouvelle orientation de Louis de Broglie. Parmi ceux-ci, Olivier Costa de Beauregard et Marie-Antoinette Tonnelat disposaient déjà avant cet événement d'une autonomie scientifique et ce revirement n'a donc eu aucune incidence sur les directions de leur recherche. Bien qu'il n'accueillît avec pas plus de sympathie cette nouvelle orientation, Destouches intégra la possibilité d'une interprétation causale de la théorie quantique dans sa propre pensée « métathéorique ». Gérard Petiau, qui a, quant à lui, toujours été beaucoup plus proche des programmes de recherche du maître, fit quelques contributions à la théorie de la double solution<sup>738</sup>, mais le défi mathématique que représentait cette nouvelle théorie était sans doute plus important dans son esprit que des considérations philosophiques. Au total, ces physiciens continuèrent d'avoir des liens étroits avec Louis de Broglie, même s'ils ne participèrent pas tous à sa nouvelle orientation.

Jusqu'à la retraite de son poste de professeur à l'IHP, Louis de Broglie et son groupe continuèrent à se situer, sinon intellectuellement, du moins géographiquement au cœur de la physique théorique française. Son séminaire accueillait une cinquantaine de participants, et beaucoup des principaux physiciens de la nouvelle génération venaient y faire des exposés. Nous l'avons vu tout à l'heure avec Maurice Lévy, mais c'est par exemple aussi le cas de Bernard d'Espagnat, Jacques Prentki ou encore Pierre Aigrain. Plus généralement le séminaire était assez bien partagé entre les exposés portant sur la nouvelle orientation de Broglie et les exposés plus « orthodoxes » portant par exemple sur la théorie quantique des champs. Louis de Broglie continua à se trouver au cœur des « affaires » jusqu'à la fin de sa carrière, siégeant dans les plus prestigieuses commissions. Il continua également à bénéficier d'une certaine aura internationale, comme en témoigne par exemple sa participation au comité éditorial du journal international *Foundations of Physics* créé en 1970. Il s'agit donc plus d'une marginalisation intellectuelle que sociale et institutionnelle dont il est question ici, du moins en ce qui concerne Louis de Broglie. En revanche, cette marginalisation sera effective à tous les niveaux pour ses élèves, notamment à partir des années 1960 et sa retraite de l'IHP. Louis de Broglie crée alors un nouveau séminaire en compagnie de Lochak, Fer, Andrade e Silva et Thiounn dans son bureau même de secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, séminaire qui continuera à fonctionner jusqu'en 1975 et le retrait de sa fonction à l'Académie. C'est encore cette même fonction qui permet au groupe de pouvoir encore publier :

« En général, nous évitions de dire dans nos publications le but véritable de notre recherche car une allusion à un problème hétérodoxe eût dressé contre nous les « referees », chargés de juger et

---

<sup>736</sup> Lochak (1992), p. 216.

<sup>737</sup> Kleman (2011).

<sup>738</sup> Voir par exemple G. Petiau (1954).

de filtrer les articles des revues scientifiques, déjà irrités par notre style jugé « archaïque » [...]. Seuls les Comptes rendus de l'Académie des sciences nous restaient ouverts sur les problèmes qui nous tenaient à cœur, parce que nos notes étaient présentées par de Broglie<sup>739</sup> ».

Après 1975, Louis de Broglie devra créer sa propre fondation pour que son équipe puisse continuer à poursuivre ses orientations de recherche, disposant de son propre journal.

### 3- Quelques considérations politiques

Pour terminer, bien que je sois de l'avis selon lequel ce processus n'a joué qu'un faible rôle dans le processus de marginalisation de l'héritage de Broglie dans la physique française, on ne peut toutefois pas omettre de mentionner des considérations d'ordre politique. Issu d'une famille aristocratique, Louis de Broglie a été classé pour cette raison du côté des physiciens conservateurs, au même titre que son frère ou encore Louis Leprince-Ringuet. De Broglie n'a jamais exprimé de sympathie pour le socialisme ou le communisme, et on peut reprendre l'expression consacrée selon laquelle ceux qui ne sont pas de gauche sont de droite, mais il ne semble pas que Louis de Broglie ait jamais exprimé en public un quelconque engagement politique. Ce qui a cristallisé l'attention sur ce point sont ses supposés accointances avec le régime de Vichy, du fait de sa nomination d'office au Conseil national du Gouvernement de Vichy. En Juin 1944, Louis de Broglie est suspendu de son poste de Professeur à la Faculté de Paris, et une enquête est lancée quant à son action. Le 6 Octobre 1944, une lettre du Recteur de l'Académie de Paris au Ministre de l'éducation nationale indique :

« La commission d'Épuration de l'Académie de Paris – Sous commission de l'Enseignement Supérieur – vient d'examiner le cas de M. Louis de Broglie qu'une décision récente a suspendu de ses fonctions de professeur à la Faculté des Sciences de Paris. Cet examen a abouti aux conclusions suivantes que je crois devoir vous transmettre immédiatement. La commission m'informe tout d'abord qu'elle n'avait jamais songé à examiner le cas de M. Louis de Broglie, sachant par ailleurs que son activité, tant à la Faculté qu'en dehors, n'a jamais donné lieu à aucune critique, et que, bien au contraire, son attitude patriotique a été parfaite. La commission a été saisie d'une lettre de l'intéressé d'où il ressort que sa nomination au Conseil national du Gouvernement de Vichy a été faite sans qu'il eût été consulté au préalable, que cette nomination ne lui a jamais été signifiée officiellement, et qu'enfin il a refusé de se rendre à Vichy pour siéger la seule fois où il en ait eu l'occasion<sup>740</sup> ».

Fin Octobre, Louis de Broglie est réintégré dans ses fonctions. Entre-temps, il a reçu le soutien d'Emile Borel, directeur de l'IHP et résistant pendant la seconde guerre mondiale :

« M. Louis de Broglie aurait le droit de mépriser cette mesure arbitraire, à laquelle son élection triomphale à l'Académie française peut être regardée comme une cinglante riposte. Les plus hautes autorités universitaires lui ont bien donné l'assurance que justice serait promptement rendue, mais les lenteurs administratives sont les mêmes sous tous les régimes et l'on conçoit aisément que M. Louis de Broglie soit ulcéré de ces lenteurs et ne puisse supporter de courir le moindre risque, si faible soit-il, d'être confondu avec les collaborateurs de Vichy, ne serait-ce que pendant quelques jours<sup>741</sup> ».

---

<sup>739</sup> Lochak (1992), p. 232.

<sup>740</sup> Archives nationales F17/27953.

<sup>741</sup> Lettre de Borel du 2 novembre 1944 citée par Lochak (1992) p. 172, qui se trouve, selon lui, dans le fond de Broglie des Archives de l'Académie des sciences. Elle n'apparaît cependant pas dans l'inventaire, mais comme beaucoup d'autres lettres.

Même s'il ne s'agit pas ici de répondre à la question de la réelle attitude de Louis de Broglie pendant cette période, on peut cependant dire que les craintes exprimées par Borel étaient fondées puisque la réputation d'un de Broglie pétainiste reste encore aujourd'hui assez répandue. Dans un milieu intellectuel globalement dominé par la gauche<sup>742</sup> ou la droite résistante (Rocard par exemple), cet évènement ne pouvait que contribuer à ternir l'image de Louis de Broglie. Il participe en réalité à un processus beaucoup plus global qui est la mise en place d'un récit fondateur de la transition scientifique d'après-guerre. Dans ce récit, Louis de Broglie est utilisé par contraste, pour souligner le rôle en quelque sorte héroïque des grands refondateurs : ceux des résistants, internationalistes, beaucoup plus ouverts sur le monde, sur les nouvelles idées et les innovations, qui renversent l'héritage d'un physicien conservateur (à la fois sur le plan scientifique et politique), collaborateur et replié sur lui.

---

<sup>742</sup> Cet argument est toutefois fortement à nuancer du fait que Louis de Broglie était entouré de communistes parmi lesquels on retrouve Vigier qui a participé à la résistance.

# Conclusion générale

On pourrait résumer la diffusion de la mécanique quantique en France en indiquant qu'elle se déroule essentiellement en deux étapes qui se caractérisent par la place différente que Louis de Broglie occupe au sein de la physique théorique française. La première étape correspond à la période qui débute avec l'ascension institutionnelle de Louis de Broglie et prend progressivement fin au cours des quelques années qui succèdent à la seconde guerre mondiale. La seconde débute avec l'émergence de nouvelles institutions accompagnées de l'arrivée d'une nouvelle génération de théoriciens. Ces processus permettent l'apparition de nouveaux centres de physique théorique comme l'ENS, le CEA puis Polytechnique et Orsay, en même temps qu'elles permettent de redéfinir les objectifs des théoriciens. La transition entre ces deux étapes est un processus complexe dans lequel se mêlent de multiples aspects. Des aspects scientifiques, bien sûr, avec la confrontation de différentes idées, mais également différentes façons de pratiquer la physique théorique. Des aspects institutionnels et démographiques, dans la mesure où l'apparition d'opportunités de carrières de théoricien pour un plus grand nombre après la seconde guerre mondiale rabat les cartes de la place occupée par Louis de Broglie au sein de la communauté des physiciens français. Des aspects de relations interpersonnelles enfin, dans la mesure où certaines attitudes adoptées par Louis de Broglie ne cessent de poser questions.

## I- L'ère de Broglienne de la mécanique ondulatoire en France

L'ascension de Louis de Broglie au sein de la physique française débute avec la reconnaissance de ses travaux à l'étranger. La diffusion de la mécanique quantique en France suit cette ascension. Presque totalement absente de la production physique française lors des premières années qui succèdent à son apparition, la mécanique quantique, sous son aspect ondulatoire, commence au tournant des années 1930 à devenir l'objet de l'attention d'une poignée de jeunes physiciens qui peuvent débiter une carrière de théoricien grâce à l'apparition de nouveaux financements (notamment la CRS). Auparavant réservée à quelques travaux de Léon Brillouin et de Louis de Broglie et à quelques discussions à l'intérieur du cercle de Paul Langevin, la mécanique quantique acquiert une certaine respectabilité à partir de la toute fin des années 1920. La nomination de Louis de Broglie à la Sorbonne, d'abord en tant que maître de conférences puis en tant que professeur titulaire de chaire sanctionne ce processus.

Par la force des choses, et sans doute presque malgré lui, Louis de Broglie se voit propulser à la tête d'un petit groupe de jeunes théoriciens dont la principale figure se nomme Jean-Louis Destouches. Plus structurés et rassemblés autour du maître et de son nouveau séminaire (1932) que les physiciens théoriciens « indépendants » (notamment Solomon, Proca, Goldstein, Elsasser), ces physiciens se tiennent au cœur de la physique théorique française. C'est donc principalement à travers l'enseignement de Louis de Broglie, ou du moins, en subissant largement l'influence de ses propres idées que la plupart des théoriciens débutant leur carrière durant les années 1930 en France sont initiés



à la mécanique quantique. Une des principales conséquences de cet état de fait semble avoir été le caractère des travaux réalisés en France dans le domaine de la physique quantique relativiste, domaine de prédilection de Louis de Broglie. Dans une recherche de synthèse entre la description théorique de la lumière et celle de la matière, synthèse qui était au cœur même de ses premières intuitions des années 1920 et que les travaux ultérieurs de Schrödinger n'ont pas permis de concrétiser de manière satisfaisante, Louis de Broglie tente d'intégrer le photon au sein de l'édifice de la mécanique ondulatoire. Par la « fusion » des équations d'onde de deux « demi-photons », il fonde la « mécanique ondulatoire du photon », théorie sur laquelle travailleront une bonne partie de ses élèves, notamment Gerard Petiau, Jean-Louis Destouches et Marie-Antoinette Tonnelat. Ainsi, la mécanique ondulatoire du photon a rencontré en France beaucoup plus de succès que sa concurrente pourtant beaucoup plus répandue dans les pays étrangers, la théorie quantique des champs électromagnétiques. On trouve même trace, dans les travaux d'Alexandre Proca – pourtant intellectuellement largement indépendant de ce groupe – des idées de Brogliennes à travers sa reprise de l'idée composite de la lumière. L'exception est Jacques Solomon, beaucoup plus immergé que ses collègues français dans le réseau international de physique théorique qui a pour cœur Copenhague, et qui consacre sa thèse à la théorie quantique des champs.

Une recherche indépendante de la sphère d'influence de Broglienne existe cependant. Il s'agit des physiciens théoriciens qui privilégient les applications de la mécanique quantique à des sujets comme la physique du solide (Brillouin), la physique de l'atome (Goldstein) et du noyau (Goldstein, Elsassner). Mais pour des raisons diverses, ces physiciens ne font pas souche. On ne retrouve d'ailleurs aucun de ces physiciens dans la communauté des théoriciens français après les années 1950, si bien qu'il n'y a aucun lien de filiation entre eux et la génération des Messiah, Lévy, Michel ou Friedel.

Ce portrait dressé de l'hégémonie de Broglienne durant cette période est cependant trompeur si on en reste là. Dans tout ce processus, De Broglie joue un rôle en réalité plutôt passif. Penseur essentiellement solitaire, si ses idées sur la physique quantique possèdent une influence sur les travaux de ses élèves, il ne leur impose et ne leur inculque en revanche aucun style de recherche particulier. Le sien propre, qui mélange approches formelles et intuition physique imagée ne semble pas avoir été imité. A la recherche d'une théorie unifiée de la microphysique, Louis de Broglie travaille essentiellement par grands projets. Sa physique théorique se conçoit comme une tentative de dégager une description des processus physiques élémentaires, et non pas d'adapter des méthodes standardisées de résolution de problèmes. Or, si la deuxième pratique est en partie basée sur le maniement d'une boîte à outil théorique qui peut se transmettre, la première, celle de Louis de Broglie, correspond à la construction d'une œuvre unique. On peut apprendre à se servir de la théorie des perturbations, des graphes de Feynman, de la méthode des champs auto-cohérents et de la théorie des groupes. On ne peut en revanche guère apprendre à découvrir la dualité onde-corpuscule. Ses élèves, qu'ils soient portés vers la résolution des équations d'onde (Petiau) où vers des approches axiomatiques (Destouches), n'apprennent donc pas réellement leur métier chez Louis de Broglie, même si ses idées ont un grand impact dans leur production scientifique. Disposant d'une connaissance mathématique plus ample que leur maître, travaillant beaucoup plus volontiers dans l'abstraction, l'aspect imagé de la mécanique ondulatoire n'est nullement décisif dans leurs travaux. Ces physiciens sont en effet très à l'aise avec l'algèbre des opérateurs et le maniement des espaces abstraits. Il serait donc exagéré de parler d'école de Broglienne de mécanique ondulatoire en France.

Passif semble avoir également été le rôle de Louis de Broglie sur le plan institutionnel. Si Louis de Broglie a prêté le prestige de son nom à quelques initiatives visant à promouvoir la physique théorique moderne en France, il n'en fut pas à l'origine et porta un avis même plutôt réservé quant à la généralisation de l'enseignement de ces théories au sein des Grandes Ecoles et dans les premières années d'études supérieures scientifiques, semblant même largement sous-estimer les applications nombreuses qu'elle aurait après la seconde guerre mondiale. Et de fait, la pratique de la mécanique quantique en France est restée relativement modeste pendant les années 1930 et 1940, même si Paris ne constituait pas un absolu désert théorique comme on le prétend souvent. En revanche, le principal maux dont a souffert Paris est l'isolement. Malgré l'invitation régulière de physiciens étrangers à venir faire des conférences de physique théorique, invitations prévues dans les statuts même de l'Institut Henri Poincaré, seuls les physiciens à la marge du groupe de Louis de Broglie ont noué des relations étroites à l'international (Brillouin, Proca, Solomon). D'autres circonstances, comme les situations familiales ou la disponibilité de financements, rentrent en ligne de compte dans l'établissement d'échanges scientifiques, mais en contraste avec les physiciens plus proches du groupe Langevin-Brillouin-Perrin-Joliot-Curie, les physiciens de l'entourage de Louis de Broglie n'ont eu que très peu d'ouverture vers l'étranger. A cet égard, la personnalité réservée de Louis de Broglie n'a pas été sans conséquence.

En revanche, à travers son œuvre d'écrivain scientifique et de conférencier, il contribua massivement à faire connaître la mécanique quantique à des cercles plus larges de français.

## **II- L'ère « moderne » de la physique quantique**

Après la seconde guerre mondiale, de nombreux théoriciens, à la tête desquels on citera notamment Louis Michel (Polytechnique), Maurice Lévy (ENS et Sorbonne), Albert Messiah (CEA) et Jacques Friedel (Sorbonne), partent à l'étranger et apprennent la mécanique quantique dans les principaux centres de physique théorique mondiaux (Copenhague, Manchester, Bristol, Princeton). De retour en France, ils peuvent bénéficier d'une situation améliorée grâce notamment à l'action de quelques personnalités de la physique comme Yves Rocard (ENS), Frédéric Joliot (CEA), grâce également à une ouverture à la recherche de Polytechnique (décret Suquet) ainsi qu'à une expansion du CNRS et de la Faculté des sciences de Paris, qui leur permettent de bénéficier de positions stables, d'enseigner à leur tour les théories quantiques et de recruter ou de faire recruter de nouveaux théoriciens.

Ce mouvement est contemporain de l'expansion de domaines particuliers de la recherche en physique, notamment la physique nucléaire, la physique du solide et la physique des hautes énergies, caractérisées par d'étroits rapports entre développements théoriques quantiques et nouveaux résultats expérimentaux. La maîtrise de la mécanique quantique, pensée comme un outil théorique, devient ainsi une nécessité pour le développement de ces champs de recherche. Il n'est pas question de présenter aux étudiants désireux de se lancer dans ces domaines la mécanique quantique sous l'angle de ses implications pour la pensée spéculative, sous l'angle du déficit à l'entendement humain qu'elle représente, ou encore en insistant sur la place nouvelle qu'elle donne à l'observateur dans le monde. Ces nouvelles branches posent en effet leurs propres problèmes, leurs propres questions, et il faut avant tout que les physiciens qui les abordent soient outillés pour les affronter. Il faut donc que les

étudiants apprennent à se servir de la mécanique quantique, et pour cela, qu'ils maîtrisent les différentes méthodes de calcul et qu'ils sachent résoudre des exercices. Des exercices que l'on retrouve bien sûr proposés dans le premier grand manuel de physique quantique d'après-guerre, le manuel d'Albert Messiah, mais que l'on ne retrouve pas dans les livres de Louis de Broglie. Signe sans doute qu'ils ne sont pas, dans l'esprit de leur auteur, destinés à remplir les mêmes fonctions.

Ces physiciens qui ont fréquenté, et souvent peu apprécié, les enseignements de Louis de Broglie et de ses élèves (notamment Jean-Louis Destouches) jugent alors que ce groupe médite trop sur des questions purement conceptuelles, quelquefois à la limite de l'épistémologie, et attendent avant tout de participer pleinement aux développements des théories quantiques tels qu'ils se font dans les pays anglo-saxons. Ils sont aussi plus habitués à collaborer, à travailler en équipe, à signer des articles à plusieurs. Louis de Broglie représente à leurs yeux en quelque sorte l'anti-modèle du savant solitaire perdu dans ses pensées contemplatives.

Alexandre Proca représente quant à lui la victime de la sclérose théorique engendrée par la trop grande importance prise par la figure de Louis de Broglie en France. Il est considéré par la nouvelle génération comme l'initiateur du redémarrage de la physique théorique française, comme celui qui va enfin, progressivement, la sortir de l'influence stérile de Louis de Broglie. Et le fait qu'il n'ait pas pu bénéficier en France d'une position à la hauteur de son mérite constitue une faute pour laquelle Louis de Broglie se voit accorder une grande responsabilité.

Le choix de Louis de Broglie de revenir à une interprétation causale de la mécanique quantique devait, de plus, définitivement régler sa perception par la nouvelle génération comme celle d'un physicien archaïque. Comme l'indique Georges Lochak, mais comme on peut également s'en persuader en lisant les écrits de nombreux physiciens, les principaux opposants à « l'interprétation de Copenhague » ont été, comme Louis de Broglie, jugés archaïques. Ceci est le cas notamment pour Albert Einstein. Mais ils n'ont en général pas été considérés comme aussi néfastes pour le développement de leur propre discipline que ne l'a été Louis de Broglie en France. Pourtant, ce jugement semble assez exagéré. Penser que de Broglie aurait choisi de mauvaises options théoriques, n'aurait pas mis au service de la France son prestige acquis par son prix Nobel de physique dans les relations internationales, ou aurait sous-estimé les applications de la mécanique quantique est légitime. Mais le rôle de moteur que n'a pas joué Louis de Broglie, Léon Brillouin par exemple, tout en conservant un prestige intact chez les physiciens contemporains en raison de la modernité de ses travaux, ne l'a pas non plus joué. Quoi qu'il en soit, le destin de Louis de Broglie dans la postérité des scientifiques français rejoint en quelques sortes celui réservé à des grandes figures du XIX<sup>ème</sup> et du début du XX<sup>ème</sup> siècle, comme Marcelin Berthelot ou Pierre Duhem, qui partagent chacun à leur manière le fait d'avoir été reconnu comme de grands contributeurs de la science française tout en ayant été considérés comme des obstacles au développement de certaines branches de celle-ci.

# Annexe 1 : Résultats d'une étude comparative entre le Journal de physique et le Radium et les Proceedings of the Royal Society

## I- Travaux expérimentaux

Dans son ouvrage<sup>743</sup>, Pestre a effectué des sondages au sein de *Physical Review* au cours des années 1922, 1927, 1934, et 1939 et a confronté les résultats à une étude similaire entreprise pour le *Journal de Physique et le Radium*. Concernant une comparaison avec la Grande-Bretagne, j'ai choisi les *Proceedings of the Royal Society* (PRS), et en me restreignant aux articles de physique (c'est-à-dire en ne comptabilisant pas les articles de chimie et les articles purement mathématiques).

Tout comme la *Physical Review*, les PRS sont beaucoup plus volumineux que le *Journal de Physique*, si bien que j'ai comparé la production de trois années du *Journal de Physique* pour une année de PRS. C'est bien entendu le pourcentage (entre parenthèse) et non pas le nombre total d'articles qui signifie quelque chose ici. Les articles théoriques font l'objet d'une étude à part (2). Il a été tentant dans un premier temps de se contenter de compléter l'étude de Pestre en comparant uniquement les résultats obtenus pour les PRS par les résultats de Pestre pour le *Journal de Physique*, mais il est vite apparu que ce genre de comparaison souffrirait de lacunes méthodologiques trop importantes. D'une part, des différences de choix systématiques auraient été faites dans la classification de certains types d'articles, faussant de manière significative la comparaison. D'autre part, il est souvent difficile de s'adapter à la grille de lecture d'une autre personne en ne possédant pas toutes les informations pertinentes à sa mise en place. J'ai donc préféré proposer mes propres catégories d'analyses. Celles-ci ont peut-être la caractéristique d'être d'avantage tournées vers les objets de recherche que vers les méthodes d'investigation. Par l'exemple, j'ai placé au sein de la même catégorie les études portant sur la structure des atomes et des molécules, quelques soient l'appareillage expérimentale et les méthodes utilisées pour y parvenir (spectroscopique, électronique, etc.). On peut se poser la question de la pertinence d'un tel choix, étant donné que les méthodes permettent souvent de mieux délimiter les différents domaines que les objets, mais le choix des méthodes comme critère d'analyse aurait demandé pour chaque article une lecture très attentive qui aurait donné à cette étude une ampleur beaucoup trop importante.

J'ai donc effectué de nouveau par moi-même un classement des articles du *Journal de Physique*, pour être sûr que les critères d'analyses soient les mêmes pour les deux journaux. Les résultats pour le *Journal de Physique et le Radium*, peuvent donc être assez différents de ceux de Pestre. Je présente ici seulement les résultats pour la physique subatomique, l'optique et l'étude des propriétés des corps (solides, liquides ou gazeux).

---

<sup>743</sup> Pestre (1984).

Rubrique	Sous-rubrique		1922 <sup>744</sup>		1927		1934		1939	
			JP	PRS	JP	PRS	JP	PRS	JP	PRS
Physique subatomique  (Radioactivité, physique nucléaire, rayons cosmiques et physique corpusculaire)	Nombre d'articles  (% par rapport au nombre total d'articles de physique dans le journal)		8  (11)	5  (9)	9  (12)	9  (8)	47  (38)	34  (25)	43  (32)	20  (21)
Optique + physique atomique et moléculaire			22  (31)	17  (30)	27  (35)	37  (31)	26  (21)	30  (22)	28  (21)	16  (16)
Propriétés de la matière	Propriétés électriques, électroniques et magnétiques des corps		13  (18)	4  (6)	14  (18)	27  (24)	12  (15)	14  (10)	6  (5)	14  (14)
	Investigation de la structure de la matière (réseaux cristallins, etc.)		1  (1)	1  (1)	0	13  (11)	3  (2)	17  (13)	2  (1)	9  (9)
	Propriétés thermo.		2  (3)	5  (9)	1  (1)	4  (3)	1  (1)	9  (7)	2  (1)	5  (5)
	Propriétés méca.	Solide	1  (1)	5  (9)	3  (4)	7  (6)	2  (2)	2  (1)	1  (1)	3  (3)
		Fluide	2  (3)	2  (4)	2  (3)	3  (3)	2  (2)	6  (4)	5  (4)	2  (2)
	Autres				1  (1)		3  (2)	1  (1)	2  (1)	
	Total		19	16	21	43	23	49	25	33

<sup>744</sup> Lire 1924-1925-1926 pour le *Journal de Physique et le radium*. Le même principe s'applique aux autres années.

		(27)	(28)	(27)	(36)	(18)	(36)	(19)	(34)
Total (y compris autres catégories non présentées ici).		70	57	77	119	120	134	128	97

## II- La physique théorique

Voici maintenant les principaux résultats pour la physique théorique

Rubrique	Sous-rubrique	1922		1927		1934		1939	
		JP	PRS	JP	PRS	JP	PRS	JP	PRS
Développements généraux sur un cadre théorique	Physique Quantique	2 (7)		8 (44)	3 (10)	9 (14)	3 (7)	9 (18)	
	Relativité (Restreinte et générale)			1 (6)			1 (2)	1 (2)	
Travaux à visée principalement mathématique					1 (3)	1 (2)			
Travaux à visée philosophique ou épistémologique						1 (2)		3 (6)	
Modélisation de la matière	Approche macroscopique	5 (18)	7 (58)	1 (6)	7 (23)	4 (6)	6 (14)	9 (18)	9 (20)
	Approche microscopique	6 (21)	2 (17)	4 (22)	3 (10)	15 (23)	14 (33)	12 (24)	17 (38)



Physique atomique		1 (4)			4 (13)	8 (13)	3 (7)		2 (5)
Physique moléculaire				1 (6)	2 (7)	2 (3)	4 (9)	4 (8)	4 (9)
Physique du noyau						8 (13)	1 (2)	7 (14)	
Physique des particules et de leurs interactions	Théories générales				4 (13)	1 (2)	8 (19)	4 (8)	8 (18)
	Applications	1 (4)			1 (3)	6 (10)	2 (5)	4 (8)	2 (5)
Total - y compris autres catégories non présentées ici. (Taux d'articles théoriques par rapport à l'ensemble)		28 (29)	12 (17)	18 (19)	30 (20)	63 (34)	43 (25)	61 (32)	44 (31)
Total « physique théorique moderne » (c'est-à-dire en ne comptant pas les approches classiques macroscopiques).		12 (12)	2 (3)	15 (16)	18 (12)	51 (27)	36 (20)	49 (25)	33 (23)

## Annexe 2 : La mécanique ondulatoire, l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde et le problème de la création et de l'annihilation des particules

### I- Un procédé heuristique pour établir l'équation de Schrödinger et son application aux équations d'onde relativiste

Il existe des rapports formels étroits entre les équations de la mécanique quantique telles qu'elles ont été établies par Heisenberg et Schrödinger et les équations de la mécanique classique. On peut par exemple très facilement dériver l'équation de Schrödinger à partir de considérations extrêmement simples. Pour ce faire, on peut partir de la formule classique de l'énergie d'une particule qui s'écrit (j'écris ici les équations à 1 dimension pour alléger l'écriture) :

$$(1) E = H = \frac{p^2}{2m} + V(x)$$

D'autre part, l'hypothèse de Louis de Broglie consiste à associer une onde à chaque particule, onde dont les propriétés sont définies par les relations :

$$(2) p = \hbar k ; E = \hbar \omega$$

Or, si nous écrivons l'expression d'une onde plane  $\psi = Ae^{-\frac{i}{\hbar}(\omega t - kx)}$ , nous constatons que l'application des opérateurs différentiels  $\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x}$  et  $i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$  à la fonction d'onde  $\psi$  permet d'obtenir les équations :

$$(3) \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} \psi = \hbar k \psi ; i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \hbar \omega \psi$$

Et en utilisant les relations de Louis de Broglie (2) :

$$(4) \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} \psi = p \psi ; i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = E \psi$$

On peut donc poser une méthode qui permet d'établir l'équation d'onde quantique à partir de l'expression de l'Hamiltonien classique. En voici les étapes

-Multiplier l'équation (1) par  $\psi$ .

-Faire, d'après les relations (4), les substitutions :

$$(5) \quad p \rightarrow \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} \text{ et } E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$$

On obtient alors l'équation de Schrödinger :

$$(6) \quad -\frac{\hbar^2 \Delta \psi}{2m} + V(x)\psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi$$

Si on pratique le même procédé à l'expression relativiste de l'énergie (pour une particule libre afin d'éviter l'alourdissement des équations) :

$$(7) \quad E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

On obtient directement l'équation dite de « Klein-Gordon » :

$$(8) \quad \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \Delta \psi = -\frac{m^2 c^4}{\hbar^2} \psi$$

## II- Les équations relativistes et l'interprétation probabiliste de la mécanique ondulatoire

À ce stade, deux problèmes surgissent. Le premier est que l'équation (8) admet des solutions pour lesquelles  $E = \pm \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$ , c'est-à-dire que des solutions qui représenteraient des particules possédant une énergie négative ne sont pas à exclure. Le second est que l'interprétation probabiliste de la mécanique ondulatoire semble être incompatible avec l'équation de Klein-Gordon. En effet, l'interprétation probabiliste de la mécanique ondulatoire consiste à poser :

$$(9) \quad \rho = \psi^* \psi :$$

$$(10) \int_{x_2}^{x_1} \rho dx = \text{probabilité de trouver la particule entre les points } x_1 \text{ et } x_2$$

Or, dans le cas de l'équation de Klein-Gordon, la quantité  $\psi^*\psi$  est un scalaire (c'est-à-dire est invariante par un changement de référentiel) alors que la quantité  $dx$  subit la contraction de Lorentz, si bien que la probabilité de trouver une particule dans une région de l'espace différerait selon que l'on effectue la mesure d'un référentiel ou d'un autre. Si, par exemple, on enferme une particule dans une boîte hermétique, on a, *a priori*, une chance de 1 de trouver la particule dans cette boîte, c'est-à-dire que si on prend  $x_1$  et  $x_2$  comme extrémités de la boîte, on a :

$$(11) \int_{x_2}^{x_1} \rho dx = 1$$

Or, si on calcule cette quantité d'après les coordonnées d'un autre référentiel, on s'aperçoit que le domaine d'intégration se restreint (la longueur de la boîte subit une contraction de Lorentz, alors que la fonction à intégrer reste la même, si bien que la valeur diffèrera de 1). Autrement dit, nous tombons sur le résultat paradoxal qu'une particule qui a 100% de chance de se trouver à l'intérieur d'une boîte pour un observateur puisse avoir une probabilité non nulle de se trouver à l'extérieur de cette boîte par un observateur en translation uniforme vis-à-vis de cette boîte. Plus généralement,  $\psi^*\psi$  n'obéit pas à une équation de continuité de l'hydrodynamique de la forme :

$$(12) \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial j}{\partial x}$$

où  $j$  serait le « courant de probabilité », ce qui équivaut à dire que la probabilité n'est pas conservée.

Une manière de contourner le problème est de changer l'expression de la densité de probabilité de présence  $\rho$ , en posant :

$$(9bis) \quad \rho = \psi^* \frac{\partial \psi}{\partial t} - \psi \frac{\partial \psi^*}{\partial t}$$

$$j = \psi^* \frac{\partial \psi}{\partial x} - \psi \frac{\partial \psi^*}{\partial x}$$

Il découle alors de l'équation (8) et de la définition (9bis) que (12) est respectée, ce qui permet d'éviter ce genre de difficultés. Mais un autre problème, encore plus grave, surgit alors :  $\rho$  n'est plus définie positivement, ce qui signifie qu'une particule pourrait avoir des probabilités négatives de présence, ce qui semble encore plus absurde.

C'est conscient de ce problème que Dirac tente en 1928 d'écrire une nouvelle équation relativiste qui éviterait ces difficultés. Dirac part du principe que la probabilité doit être définie par (9) pour respecter le schéma probabiliste général de la théorie des transformations qu'il vient de mettre en place<sup>745</sup>. Il remarque ensuite que la non conservation de la densité (9) provient, dans l'équation de

<sup>745</sup> Par exemple, en utilisant des notations modernes, à partir du développement :

$$\psi(x) = \langle x | \psi \rangle = \sum_j \langle x | p_j \rangle \langle p_j | \psi \rangle = \sum_j c_j e^{\frac{ip_j x}{\hbar}}$$

Klein-Gordon, du fait que  $\psi$  obéit à une équation aux dérivées partielles du second ordre en  $\frac{\partial}{\partial t}$ . Plus généralement, le respect de la théorie des transformations et de la conservation des probabilités implique que l'équation d'évolution de la fonction d'onde soit de la forme d'une équation de Schrödinger, c'est-à-dire :

$$(13) i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi$$

D'un autre côté, la relativité impose que, si l'équation est linéaire en  $\frac{\partial}{\partial t}$ , elle doit également l'être en  $\frac{\partial}{\partial x}$  et en  $m$ . Une manière plus directe de le dire est de revenir aux remplacements (5) et d'exiger que l'Hamiltonien  $H$  de l'équation soit de la forme :

$$(14) H = E = \sum_{j=x,y,z} \alpha_j p_j + \beta mc^2$$

La relation relativiste (7) devant rester exacte, cela implique :

$$(15) E^2 = \sum_i \alpha_i^2 p_i^2 + \beta^2 m^2 c^4 + \sum_{i \neq j} \alpha_i \alpha_j p_i p_j + \sum_i (\alpha_i \beta + \beta \alpha_i) p_i m c^2 = m^2 c^4 + \sum_i p_i^2 c^2$$

où nous sommes revenus à une présentation à trois dimensions de l'espace, essentielle pour dériver toutes les caractéristiques de l'équation de Dirac.

On déduit par identification entre les deux membres de (15) :

$$(16) \alpha_i^2 = 1 ; \beta^2 = 1 ; \alpha_i \alpha_j + \alpha_j \alpha_i = 0 ; \alpha_i \beta + \beta \alpha_i = 0$$

Les équations (16) n'ont bien sûr pas de solutions pour des nombres classiques (les c-nombres), mais peuvent en revanche en trouver si on admet que les  $\alpha_i$  et  $\beta$  sont des matrices 4x4, le chiffre 1 dans (14) devient alors la matrice unité à 4 dimensions. Dans ce cas, ces équations admettent plusieurs solutions. Une solution particulièrement commode correspond à :

$$\alpha_x = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} ; \alpha_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & -i & 0 \\ 0 & i & 0 & 0 \\ -i & 0 & i & 0 \end{pmatrix} ; \alpha_z = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\beta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Reprenant la substitution (5) pour l'équation (14), on obtient l'équation de Dirac :

---

Où les  $c_j$  sont les coefficients de Fourier du développement en série de  $\psi(x)$ , l'interprétation probabiliste de  $c_j$  (l'amplitude de probabilité de trouver la particule à l'état  $p_j$ ) est étroitement liée à l'interprétation probabiliste de  $\psi(x)$ , si bien que la théorie des transformations est en danger dans le cas où la fonction d'onde perd sa signification probabiliste.

$$(17) \quad i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left( \sum_{j=x,y,z} \alpha_j \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x_j} + mc^2 \beta \right) \psi$$

La nature des matrices de Dirac implique que  $\psi$  symbolise, pour faire le plus simple possible<sup>746</sup>, une matrice colonne à 4 composantes. Une étude de l'invariante relativiste de cette équation permet de démontrer que si on définit  $\rho$  et  $\vec{j}$  tels que :

$$(18) \quad \rho = \psi^\dagger \psi \\ \vec{j} = \psi^\dagger \vec{\alpha} \psi$$

où  $\vec{\alpha}$  est un « vecteur » de matrices ayant pour composantes les trois matrices  $\alpha$ , et  $\psi^\dagger$  le vecteur conjugué de  $\psi$ , alors  $\rho$  et  $\vec{j}$  forment un quadrivecteur d'espace-temps  $j^\mu(\rho, \frac{\vec{j}}{c})$ , ce qui garantit que l'équation de continuité de l'hydrodynamique, et donc la conservation des probabilités, sont respectées. Les choses se présentent plutôt bien jusqu'à maintenant, mais elles se compliquent lorsque l'on cherche les solutions de l'équation (17). Les solutions les plus simples représentent une particule au repos, mais pour une telle particule, 4 solutions se présentent :

$$(19) \quad \psi_1 = A \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} e^{-i \frac{mc^2 t}{\hbar}}; \quad \psi_2 = A \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} e^{-i \frac{mc^2 t}{\hbar}}; \quad \psi_3 = A \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} e^{i \frac{mc^2 t}{\hbar}}; \quad \psi_4 = A \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} e^{i \frac{mc^2 t}{\hbar}}$$

On voit immédiatement en injectant chacune des solutions (19) dans l'équation (17) que les deux premières solutions correspondent à des particules d'énergie  $E = mc^2$ , soit des particules au repos tout à fait normales. L'existence de ces deux premières solutions se laissent également facilement interpréter : on peut montrer que  $\psi_1$  correspond à une particule dans un état de spin  $+1/2$  selon l'axe  $z$  et que  $\psi_2$  correspond à une particule dans un état de spin  $-1/2$  toujours selon l'axe  $z$ . En revanche, les deux autres solutions correspondent à des valeurs propres de l'Hamiltonien  $E = -mc^2$ , c'est-à-dire des particules à énergie négative. On retombe donc sur le premier problème qui gangrenait déjà l'équation de Klein-Gordon. On peut enfin montrer que les solutions pour une particule libre de quantité de mouvement  $p$  quelconque (pour simplifier, suivant l'axe des  $z$ , et nulle pour les autres) se mettent sous la forme :

$$(20) \quad \psi_1 = A \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ p \\ mc + W/c \end{bmatrix} e^{-i \frac{(Wt - pz)}{\hbar}}; \quad \psi_2 = A \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -p \\ mc + W/c \end{bmatrix} e^{-i \frac{(Wt + pz)}{\hbar}} \\ \psi_3 = A \begin{bmatrix} -p \\ mc + W/c \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} e^{i \frac{(Wt - pz)}{\hbar}}; \quad \psi_4 = A \begin{bmatrix} 0 \\ p \\ mc + W/c \\ 1 \end{bmatrix} e^{i \frac{(Wt + pz)}{\hbar}}$$

<sup>746</sup> Car d'autres choix plus complexes auraient été possibles, par exemple une matrice carré 4x4, comme le fera Proca.



où  $W = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$ . L'énergie des particules représentées par les fonctions  $\psi_3$  et  $\psi_4$  ont alors une valeur négative  $-W$ . De plus, ces particules possèdent la caractéristique d'avoir une quantité de mouvement qui augmente quand leur énergie diminue.

### III- Le paradoxe de Klein

Il fut tentant pour les physiciens de conserver l'équation de Dirac en admettant que les deux derniers types de solutions n'étaient tout simplement pas des solutions physiques. Cependant, comme le montre le paradoxe de Klein, ce genre de solutions semblent devoir intervenir dans certaines situations. Klein propose en 1929 de considérer le cas suivant :

Soit un mur de potentiel électrostatique  $\phi$  qui sépare l'espace en deux, selon par exemple l'axe  $z$ . On admet par exemple que  $\phi$  possède une valeur nulle pour les  $z$  négatifs et une valeur constante mais non nulle pour les  $z$  positifs. Klein considère alors une onde de Dirac plane en régime stationnaire, correspondant à une particule d'énergie  $W$  qui se propage dans la direction des  $z$  positifs, et analyse la manière dont cette onde se réfléchit et se transmet à l'entrée de la zone de potentiel électrostatique. Les solutions du problème sont :

L'onde incidente :

$$(21) \quad \psi_I = A \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ p \\ mc + W/c \\ 0 \end{bmatrix} e^{-i \frac{(Wt - pz)}{\hbar}}$$

$$\text{L'onde réfléchie (22)} \quad \psi_R = R \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -p \\ mc + W/c \\ 0 \end{bmatrix} e^{-i \frac{(Wt + pz)}{\hbar}}$$

$$\text{Et l'onde transmise (23)} \quad \psi_T = T \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -q \\ mc + W - e\phi/c \\ 0 \end{bmatrix} e^{-i \frac{(Wt - qz)}{\hbar}}$$

Pour lesquelles on montre que (24)  $qc = \sqrt{(e\phi - W)^2 - m^2 c^4}$ . Tout se passe plutôt physiquement correctement : l'onde transmise pénètre de plus en plus difficilement dans la zone de potentiel au fur et à mesure que le potentiel augmente, jusqu'à ce que  $\phi > \frac{W + mc^2}{e}$ . Dans ce cas,  $q$  est d'après (24) un réel positif, ce qui signifie qu'une onde plane d'amplitude proportionnelle à  $T$  se propage complètement dans la zone de fort potentiel, zone dans laquelle, toujours en vertu de (24), la partie non potentielle de son énergie est négative :

$$(W - e\phi) = -\sqrt{(qc)^2 + m^2c^4}.$$

Même si l'énergie totale de la particule reste positive, l'onde transmise correspond alors à une solution qui a toutes les caractéristiques d'une onde représentant une particule à énergie négative libre, comme d'ailleurs permet de le montrer la remarque selon laquelle le potentiel électrostatique n'est défini qu'à une constante additive près. Or, à l'aide des conditions de continuités en  $z = 0$ , on peut exprimer  $R$  et  $T$  en fonction de  $A$ , de  $p$  et de  $\phi$ , et montrer que l'amplitude de probabilité de trouver la particule dans cet état  $\psi_R$  étrange peut être tout à fait conséquente. On peut également montrer ce fait curieux que la partie réfléchie de l'onde est plus importante que la partie incidente. Toujours aussi surprenant, si on interprète les résultats en termes de densité de courant électrique :

$$\vec{j} = e\vec{j} = e\psi^+ \vec{\alpha} \psi$$

Alors le courant électrique correspondant à l'onde transmise est de signe opposé à celui de l'onde incidente, alors que les deux ondes se propagent dans la même direction. Tous ces résultats ne se laissent évidemment pas facilement interpréter dans le cadre du formalisme de la mécanique ondulatoire. Dirac a cependant proposé une interprétation très astucieuse pour conserver son équation et lui donner une signification précise dans le cadre de ce formalisme. Le paradoxe de Klein fut une sérieuse incitation à prendre les états à énergies négatives au sérieux. Une autre fut le fait que la dérivation de la formule de diffusion de la lumière par un électron nécessite la prise en compte des états à énergie négative dans le calcul.

## IV- La théorie des trous de Dirac

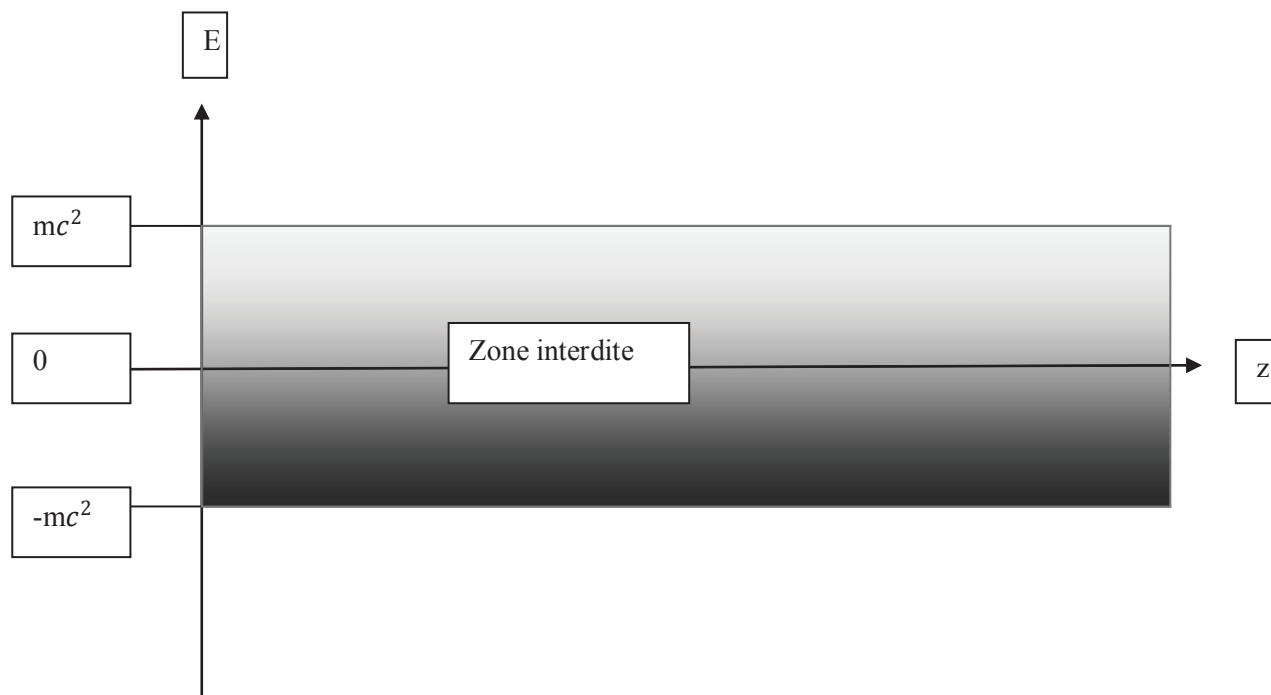
Avant même l'exposition du paradoxe de Klein, Dirac prit au sérieux l'existence des états négatifs et proposa une interprétation très audacieuse pour expliquer le fait que les électrons ne subissent que très rarement des transitions vers ces états. Il propose effectivement que tous les états d'énergie négative sont occupés par des électrons. En vertu du principe d'exclusion de Pauli selon lequel un état quantique ne peut pas être occupé par plus d'un électron, les électrons positifs ne tombent pas vers ces états d'énergies négatives car ils sont déjà presque tous occupés. En revanche, il se peut qu'un électron dans un état d'énergie négative accomplisse une transition vers un état positif, après avoir absorbé un rayon  $\gamma$  suffisamment énergétique par exemple, et libère alors une place, un trou, dans la « mer » des états à énergie négative. Selon Dirac, le vide est caractérisé par une densité de charge homogène  $\rho_0$  correspondant aux électrons d'énergies négatives (absence de trous et d'électrons d'énergie positive). Cette densité crée donc un potentiel électrostatique homogène, donc inobservable. C'est seulement lorsqu'un électron subit une transition vers un état d'énergie positive et s'échappe vers une autre région de l'espace que la charge contenue dans un petit volume  $dV$  subit une variation :

$$\rho_0 dV \rightarrow \rho_0 dV - e$$

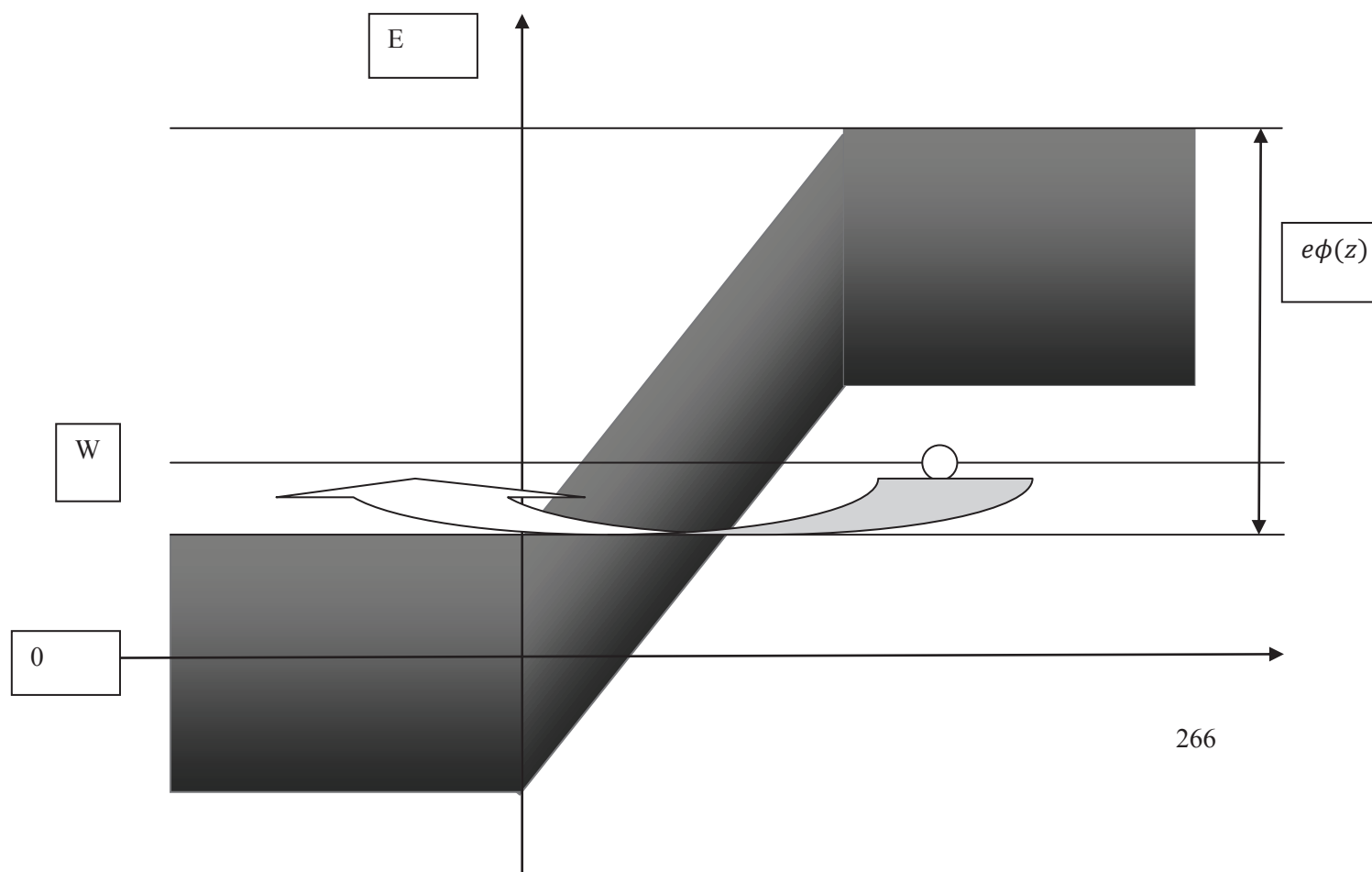
La charge  $\rho_0 dV$  étant inobservable, tout se passerait comme si une charge  $-e$  était présente ( $e$  est la charge de l'électron et est donc définie négativement :  $-e$  est donc positive). Le trou se

comporte donc comme une particule à charge positive. Bien que Dirac propose tout d'abord d'identifier ce trou au proton, il se révéla rapidement qu'il doit se comporter comme une particule de masse identique à l'électron. Dirac propose donc en 1931 l'existence d'une nouvelle particule, l'antiélectron, qui sera découverte l'année suivante.

Pour revenir au paradoxe de Klein, voici une manière d'interpréter la situation à l'aide de la théorie des trous. En l'absence de champ, les niveaux d'énergie possible pour un électron sont représentés de la manière suivante :



En revanche, si un potentiel variant brusquement est présent, le diagramme précédent se présentera de la manière suivante :



Les résultats du problème pourront alors grossièrement s'expliquer de la manière suivante : dans la zone de fort potentiel, les électrons qui sont à l'intérieur de la mer des états d'énergie négative voient leur niveau d'énergie augmenter grâce au potentiel. Les électrons de la mer qui voient leur énergie remonter jusqu'à la valeur  $W$  peuvent se trouver libérés de la mer à condition de franchir la zone sombre dans laquelle leur fonction d'onde est évanescence. Si la largeur de cette zone est suffisamment étroite (si donc le gradient du potentiel est suffisamment élevé), leur onde pénètre jusqu'à la « zone libre », ce qui signifie qu'il est possible que l'électron s'échappe de la mer par effet tunnel. C'est la raison pour laquelle l'onde réfléchi (qui additionne la probabilité de réflexion de l'électron incident et la probabilité de transmission de l'électron d'énergie négative) est plus intense que l'onde incidente. L'électron d'énergie négative laisse un trou dans la zone à fort potentiel, trou que les autres électrons de la mer tenteront de combler, ce qui provoquera un courant électrique négatif (les électrons se déplaceront successivement de droite à gauche pour combler le trou, celui-ci se déplacera donc de gauche à droite). En réalité, ceci est une explication qualitative qui est très grossière et très imagée : il est impossible par exemple, du fait du principe d'exclusion de Pauli, que l'électron émis soit dans le même état que l'électron réfléchi. Le problème est que chaque situation dans laquelle des transitions entre énergie négative et énergie positive sont permises devient un problème à  $n$  corps. Pour un traitement vraiment rigoureux, il faudrait même prendre en compte tous les électrons de la mer, ce qui nécessite, dans le cadre de la mécanique ondulatoire, de recourir à des fonctions d'onde se propageant dans l'espace de configuration de tous les électrons, méthode qui pose des difficultés au niveau relativiste (à cause du rôle dissemblable qu'elle réserve aux coordonnées d'espace et de temps) et qui serait, de plus, en pratique impossible à traiter en raison du nombre immense de particules à prendre en considération pour chaque problème élémentaire. En utilisant des méthodes d'approximations, notamment la méthode du champ auto-cohérent, de nombreux calculs pourront cependant être effectués en électrodynamique pendant les années 1930, à l'aide de la théorie de Dirac, mais il faudra recourir au formalisme de la théorie quantique des champs – ce qui nécessitera une réinterprétation du spineur de Dirac en termes d'opérateur de création et d'annihilation de particules – pour traiter plus rigoureusement ce genre de problèmes.



# Annexe 3 : La preuve de Von Neumann sur les variables cachées

## I- La preuve

En 1932, le mathématicien John Von Neumann écrit un ouvrage qui a pour objectif de formuler la mécanique quantique de manière rigoureuse sur le plan mathématique. Après avoir rappelé l'équivalence de la mécanique des matrices et la mécanique ondulatoire (chapitre 1), il développe le formalisme des espaces de Hilbert (chapitre 2) avant de reformuler les lois statistiques de la mécanique quantique dans ce nouveau cadre (chapitre 3). Le chapitre 4 est quant à lui consacré à une formulation axiomatique de la théorie. Dans ce chapitre, Von Neumann considère un ensemble statistique de système, et fait remarquer que de manière générale, cet ensemble peut être décrit par un état quantique « pur » (représenté par une fonction d'onde  $\varphi$ ) ou un mélange (l'ensemble  $E$  des  $N$  systèmes est divisé en  $n_1$  systèmes dans un état quantique  $\varphi_1$ ,  $n_2$  systèmes dans un état quantique  $\varphi_2, \dots$ , avec  $\sum_i n_i = N$ ). Quoi qu'il en soit, d'une manière générale, la mesure d'une grandeur  $R$  sur cet ensemble ne conduira pas à une valeur unique  $a_0$  mais aboutira à une dispersion positive de ces valeurs (si  $R$  est une grandeur représentée par un opérateur  $R$  qui possède comme vecteur propre  $\varphi$  - ou l'ensemble des  $\varphi_n$  dans le cas d'un mélange – alors il y a toujours une autre grandeur  $R'$  pour laquelle cela n'est pas le cas). Von Neumann indique alors :

« On peut imaginer deux explications différentes pour cet état de choses.

- I. Les systèmes partiels  $S_1, \dots, S_N$  peuvent se trouver dans des états quelconques de façon que leur ensemble  $[S_1, \dots, S_N]$  soit défini par la fréquence d'apparition relative de ces états.  
Le fait que la mesure d'une grandeur physique ne peut pas nous fournir des valeurs bien définies est alors uniquement dû à notre ignorance : nous ne savons pas d'une façon précise dans quel état se trouve le système sur lequel nous effectuons la mesure et par conséquent nous ne pouvons pas prévoir quel en sera le résultat. Mais on peut aussi imaginer que :
- II. Tous les systèmes partiels  $S_1, \dots, S_N$  se trouvent dans un seul état, mais il n'y a pas de causalité dans les lois de la Nature. La multiplicité des valeurs que nous trouvons pour une seule et même grandeur physique n'est pas due dans ce cas à notre ignorance : elle est dans l'essence même des choses : c'est la Nature elle-même qui dépasse dans ce cas le « Principe de raison suffisante<sup>747</sup> ». »

Pour expliciter l'explication I, Von Neumann indique que « [lorsque] l'on mesure une même grandeur  $R$  dans plusieurs systèmes qui se trouvent dans un même état caractérisé par une fonction d'onde  $\varphi$ , on constate que [si] on n'obtient pas le même résultat lorsque  $\varphi$  n'est pas une fonction propre de l'opérateur  $R$  de  $R$ , [c'est parce que] la description d'un état par une fonction d'onde est incomplète et que par conséquent il doit exister d'autres éléments qui achèvent de le caractériser, à savoir les « paramètres cachés ». [...] Tout ensemble statistique important, dans lequel il subsiste au

---

<sup>747</sup> Von Neumann (1932), p. 208



moins une grandeur  $R$  dont les valeurs présentent une dispersion non nulle, devrait donc pouvoir être divisé en plusieurs parties de structure différente d'après les différents états dans lesquels se trouvent les systèmes composants. ». Evaluer cette possibilité revient alors selon Von Neumann à se poser deux questions :

- 1) Est-il possible de représenter un ensemble quelconque  $[S_I, \dots, S_N]$  comportant des grandeurs  $R$  à dispersion différente de zéro, par un mélange de deux autres, distincts l'un de l'autre et du collectif initial ?
- 2) Existe-t-il des ensembles qui soient sans dispersions pour toute grandeur  $R$  ?

Von Neumann établit que la première question revient à se poser le problème suivant : Soit  $esp(R)$  l'espérance mathématique de la grandeur  $R$  sur un ensemble  $E$ . Peut-on toujours décomposer cet ensemble en un ensemble  $E'$  et un ensemble  $E''$  tel que l'on ait :

$$(I) \quad esp(R) = esp'(R) + esp''(R)$$

où  $esp'(R)$  et  $esp''(R)$  sont respectivement les espérances mathématiques de la grandeur  $R$  sur les sous-ensembles  $E'$  et  $E''$ , et tel que  $esp(R) \neq esp'(R) \neq esp''(R)$ . Von Neumann nomme un ensemble qui ne peut pas se décomposer ainsi un « ensemble pure ». S'il peut se décomposer ainsi, il s'agit alors d'un « mélange ».

La seconde question quant à elle se résume à savoir s'il existe des ensembles  $E$  tels que, pour tout  $R$ , on ait la relation :

$$(II) \quad esp(R)^2 = esp(R^2)$$

Moyennant quelques conditions auxquelles doit se soumettre raisonnablement toute fonction d'espérance mathématique d'une grandeur, parmi lesquelles celle qui sera la plus controversée, à savoir :

$$(III) \quad esp(aR + bS) = a \, esp(R) + b \, esp(S)$$

(a et b étant des nombres réels) et en posant deux conditions supplémentaires, à savoir que :

- I. Si  $R$  est l'opérateur de la grandeur  $R$ , l'opérateur de  $f(R)$  sera  $f(R)$ .
- II. Si  $R, S, \dots$  sont les opérateurs des grandeurs  $R+S+\dots$  l'opérateur de  $R+S+\dots$  sera  $R+S+\dots$ .

Von Neumann parvient à montrer que l'espérance mathématique d'un ensemble de systèmes obéissants aux prédictions probabilistes de la mécanique quantique s'écrit de la manière suivante :

$$esp(R) = Tr(UR)$$

où  $U$  est un certain opérateur possédant certaines propriétés, ne dépendant que de l'ensemble statistique (et non pas de la grandeur  $R$ ), et que Von Neumann décide d'appeler « opérateur statistique ». Von Neumann montre que les propriétés de  $U$  ne sont pas compatibles avec la condition (II) quelque soit  $R$ , ce qui répond à la question 2) par : « non, il n'y a pas d'ensembles qui soient sans dispersions pour toute grandeur  $R$  ». Concernant la question 1), il parvient à montrer qu'il existe des ensembles purs, c'est-à-dire des ensembles à dispersions non nulles qui ne sont pas décomposables par des sous-ensembles possédant des statistiques inhomogènes entre eux. Ces ensembles sont

précisément ceux qui sont décrits par une fonction d'onde unique  $\varphi$  (ou un opérateur statistique  $U = P_\varphi$  où  $P_\varphi$  est l'opérateur de projection sur  $\varphi$ ).

On laisse ici le soin à Von Neumann de conclure sa démonstration :

« Nous pouvons donc dire que dans le cadre de ces hypothèses, le conflit de la causalité est tranché et tranché au détriment de cette dernière : en effet, nous avons établi que tous les ensembles statistiques, même les ensembles purs, ne sont pas dépourvus de dispersion.

Il y aurait encore à discuter la question des « paramètres cachés » [...]. Le problème consiste à trouver si la dispersion des ensembles statistiques purs caractérisés par des fonctions d'onde  $\varphi$  ne proviendrait pas en réalité du fait que ces ensembles purs ne constituent pas les états élémentaires véritables mais bien des mélanges : en sorte que pour décrire complètement un état il faudrait se donner, en dehors de la fonction d'onde  $\varphi$ , d'autres, éléments (« les paramètres cachés ») lesquels, conjointement à  $\varphi$ , détermineraient le tout avec précision, c'est-à-dire conduiraient à des collectifs dépourvus de dispersion. Le caractère statistique du collectif pur par  $\varphi$  seul ( $U = P_\varphi, \|\varphi\| = 1$ ) apparaîtrait alors comme la moyenne sur le domaine des valeurs des « paramètres cachés » correspondant à ces états.

Or, cela est impossible pour deux raisons : premièrement parce que le collectif pur décrit par  $\varphi$ , pourrait être représenté par le mélange de deux collectifs distincts, ce qui est absurde puisque contraire à la définition même de ce collectif ; et deuxièmement parce que les collectifs à dispersion nulle qui devraient correspondre aux états « réels » ( en d'autres termes qui devraient être constitués uniquement par des systèmes dans un seul état « réels »), n'existent absolument pas. [...] Il ne s'agit pas du tout ici d'une question d'interprétation de la mécanique quantique, comme on le suppose bien souvent, mais d'une question de principe : la mécanique quantique devrait être erronée, objectivement, pour que les processus élémentaires pussent obéir à une autre loi que celle du hasard<sup>748</sup> ».

## II- Une première réfutation

La première remise en question du théorème a été apparemment faite par la mathématicienne et philosophe Grete Hermann en 1935. Reprenant ici le compte rendu qu'en fait Max Jammer<sup>749</sup>, cette remise en question repose sur l'examen de la condition (III) qui est en réalité trop restrictive et écarte *de facto* une classe importante de variables cachées. Suivant Jammer, nous pouvons prendre un exemple pour montrer en quoi cette condition est trop restrictive. En mécanique quantique, le spin selon l'axe des  $x$  ( $S_x$ ) et selon l'axe des  $y$  ( $S_y$ ) sont respectivement représentés par les matrices de Pauli  $\sigma_x$  et  $\sigma_y$  ayant toutes deux pour valeurs propres  $\pm 1$ . Le spin selon une direction médiane entre l'axe  $x$  et l'axe  $y$  (appelons le  $S_\theta$ ) est quant à lui représenté par l'opérateur  $\frac{1}{\sqrt{2}}(\sigma_x + \sigma_y)$  et possède également pour valeurs propres  $\pm 1$ . Dire maintenant que l'on possède un ensemble statistique sans dispersion pour n'importe quelle valeur, et - par exemple - caractérisé par une fonction d'onde  $\varphi$  et un jeu de variables cachées (la connaissance desquelles permet de déterminer avec certitude les valeurs de chacune de ces grandeurs), revient à dire que la valeur de  $S_x$  est égale à  $\pm 1$ , celle de  $S_y$  à  $\pm 1$  et celle de

<sup>748</sup> Von Neumann (1932), pp. 221-222.

<sup>749</sup> Max Jammer (1974), pp. 273-274.

$S_\theta$  à  $\pm 1$ , le tout avec une probabilité de 1. Autrement dit, cela revient à dire que  $\text{esp}(S_x) = \pm 1$  ;  $\text{esp}(S_y) = \pm 1$  ;  $\text{esp}(S_\theta) = \pm 1$ . Nous avons donc l'inégalité suivante :

$$(IV) \text{ esp}(S_\theta) \equiv \text{esp}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(S_x + S_y)\right) \neq \frac{1}{\sqrt{2}}\text{esp}(S_x + S_y)$$

qui est contraire à la condition (III). Supposer donc que celle-ci est valable pour des grandeurs non-commutables comme ces grandeurs de spin revient à exclure dès le début du raisonnement les variables cachées qui pourraient mener à l'inégalité (IV). Or, Von Neumann ne peut bien sûr pas prétendre avoir démontré l'inexistence de ces variables cachées si leur inexistence est déjà contenue dans les prémisses de son raisonnement (si elles existaient, la condition III ne serait plus respectée).

### III- Louis de Broglie et le théorème de Von Neumann

La réfutation du théorème de Von Neumann par Grete Hermann est passée largement inaperçue dans le milieu des physiciens. Louis de Broglie, quant à lui, ne fera mention de la démonstration de Von Neumann dans ses textes qu'à partir des années 1940, en la tenant pour valide et en l'utilisant comme argument imparable contre tout éventuel retour au déterminisme<sup>750</sup>. En 1951 cependant, Louis de Broglie reçoit l'article de David Bohm ressuscitant la théorie de l'onde pilote et proposant une nouvelle théorie de la mesure quantique. S'il n'accepte pas immédiatement la possibilité de revenir à ses anciennes conceptions, Louis de Broglie note cependant que la théorie de Bohm est une théorie à variable cachée et qu'elle reproduit les prédictions statistiques de la mécanique quantique : il doit donc y avoir une faille dans le raisonnement de Von Neumann. Après avoir décidé de revenir à la théorie de la double solution, de Broglie tente d'analyser de manière plus précise le théorème de Von Neumann, et en proposera une critique très différente de celle de Hermann<sup>751</sup>. Son analyse la plus fouillée est sans doute celle effectuée dans son ouvrage de 1957, *La théorie de la mesure en mécanique ondulatoire*<sup>752</sup>. De Broglie y démontre que la raison pour laquelle la théorie de l'onde pilote échappe au théorème de Von Neumann est que les distributions statistiques d'un ensemble de systèmes obéissant à cette théorie ne correspondent pas, *avant* la mesure, aux distributions qui sont révélées *par* la mesure. Autrement dit, les valeurs des différentes variables avant la mesure ne correspondent pas à celles qu'elles vont prendre après la mesure.

Un exemple simple permet d'expliquer en quoi consiste le cœur du raisonnement de Louis de Broglie. Considérons un ensemble d'objets possédant deux grandeurs mesurables non compatibles (les opérateurs qui les représentent en mécanique quantique ne commutent pas) et admettons que ces deux grandeurs ne peuvent prendre que deux valeurs. Pour fixer les idées, considérons que nos systèmes soient des figures géométriques colorées et que les « grandeurs » soient la « forme » (ayant pour

<sup>750</sup> En 1945, Louis de Broglie affirme par exemple, en faisant référence à la démonstration : « Mais et nous touchons un point capital, il semble bien qu'il soit impossible de ramener de cette façon, par l'introduction de variables cachées, l'indéterminisme quantique à un déterminisme sous-jacent [...] La voie qui paraissait rester ouverte dans cette direction pour restaurer le déterminisme à l'échelle atomique semble donc se fermer devant nous. » (De Broglie (1945).)

<sup>751</sup> On ne cherchera pas ici à examiner le lien logique entre la critique de Grete Hermann et celle de Louis de Broglie, les deux arguments fournis par ces deux auteurs étant assez différent.

<sup>752</sup> De Broglie (1957).

« valeur » « rond » et « carré ») et la couleur (ayant pour « valeur » « blanc » et « noir »). Définissons les probabilités pour :

- Qu'un système soit carré :  $P_c$ .
- Qu'un système soit rond :  $P_r$ .
- Qu'un système soit blanc :  $P_b$ .
- Qu'un système soit noir :  $P_n$ .
- Qu'un système soit blanc (noir) dans un collectif composé entièrement de carré (rond) :  $P_{b/c}$ ;  $P_{n/c}$ ; etc ...

Si nous admettons qu'à chaque instant, chaque système possède à la fois une forme et une couleur bien déterminées, alors il est tentant de penser que nous devons avoir entre toutes ces probabilités la relation suivante :

$$(A) \quad P_n = P_c P_{n/c} + P_r P_{n/r}$$

Relation qui indique seulement que le nombre d'objets noirs est la somme des carrés noirs et des ronds noirs. Or, la mécanique quantique attribue aux différents états de couleurs et de formes des amplitudes<sup>753</sup>  $A_n, A_b, A_r, A_c$  telles que, par exemple, la probabilité  $P_n$  de trouver la valeur  $n$  si on réalise une mesure de la couleur soit égale à  $\|A_n\|^2$ . Cependant, la relation (A) ne tient plus, et on obtient à la place<sup>754</sup> :

$$(B) \quad P_n = P_c P_{n/c} + P_r P_{n/r} + A_c^* A_{n/c}^* A_r A_{n/r} + A_r^* A_{n/r}^* A_c A_{n/c}$$

Louis de Broglie admet donc que la différence entre les propriétés (B) de l'ensemble quantique et celles (A) d'un ensemble classique empêche que l'on puisse considérer, avant la mesure, que l'on dispose d'un ensemble de  $N$  particules décomposables en quatre ensembles sans dispersions respectivement de  $N P_c P_{n/c}$  carrés noirs,  $N P_c P_{b/c}$  carrés blancs,  $N P_r P_{b/r}$  ronds blanc et  $N P_r P_{n/r}$  ronds noirs, et c'est pour lui tout ce que parvient à démontrer le théorème de Von Neumann. « Mais, note de Broglie, rien n'empêche d'imaginer qu'en introduisant des variables cachées, on puisse définir des distributions de probabilité, *cachées elles aussi*, qui dans l'état initial, avant l'exécution de toute mesure, correspondrait à un collectif unique et permettrait d'obtenir un schéma déterministe<sup>755</sup> ». Dans cette perspective, le fait de décomposer l'ensemble statistique en  $N P_n$  noirs et  $N P_b$  blancs n'est valable qu'après une mesure de la « couleur », et dans ce cas, les  $N P_n$  noirs ne sont en général pas composés de  $N P_c P_{n/c}$  carrés et de  $N P_r P_{n/r}$  ronds, mais respectent une autre distribution « cachée »<sup>756</sup> qui, à son tour, tendra vers la distribution précédente uniquement après une éventuelle mesure de la « forme » : une partie des ronds sera transformée en carrée, et/ou vis versa, par l'acte de la mesure, et ce de manière entièrement déterministe<sup>757</sup>. Tant que ces distributions évoluent vers la distribution

<sup>753</sup> Les amplitudes sont des nombres complexes.  $A^*$  signifie « complexe conjugué de  $A$  ».

<sup>754</sup>  $P_n = \|\langle n|\psi \rangle\|^2$  avec  $\langle n|\psi \rangle = \langle n|c \rangle \langle c|\psi \rangle + \langle n|b \rangle \langle b|\psi \rangle$

<sup>755</sup> De Broglie (1957) p. 29.

<sup>756</sup> A noter que dans la théorie de l'onde pilote ou de la double solution, une distribution possède un statut particulier en ceci qu'elle n'est jamais cachée : il s'agit de la distribution de probabilités des positions, qui correspond, immédiatement *avant* la mesure, à la distribution révélée *par* la mesure.

<sup>757</sup> Dans la théorie de l'onde-pilote ou de la double solution, les paramètres cachés du système étudié (dans notre exemple la forme ou la couleur) ne déterminent pas à elles seules l'évolution du système : il faut en plus

prédite par la mécanique quantique *après la mesure*, il importe peu que ces distributions cachées ne soient pas conformes aux distributions envisagées par la mécanique quantique et elles n'ont donc pas à satisfaire cette condition requise par la démonstration de Von Neumann.

# Bibliographie

## I- Archives et documents d'époque

Académie de Paris,  
(1920-1960), *Le carnet de l'étudiant*, Université de Paris.

### Archives de l'Académie des sciences :

#### (42J/Fond de Broglie) :

Broglie, Louis de

Titres divers, boîte 1.

Listes des cours donnés à l'IHP, boîte 1.

(1924), « Rapport de Langevin sur la thèse de Louis de Broglie », boîte 1.

(1944-A), « L'activité du Centre de théories physiques de l'Institut Henri Poincaré pendant les dernières années », boîte 40.

(1944-B), « L'enseignement de la physique à l'Ecole polytechnique et dans les écoles d'application », boîte 40.

(1957), Lettre de Louis de Broglie à Maurice Lévy datant du 12 mars 1957, boîte 26.

(1972), « Articles pour le livre du 80ème anniversaire », boîte 30.

Dirac, P.A.M.

(1925), Lettre à Louis de Broglie datant du 22 juillet 1925. Dossier « correspondance scientifique ».

Lévy, Maurice

(1957), Lettre de Maurice Lévy à la rédaction du Journal « Le Monde », le 19 février 1957. Boîte 26.

Lorentz, H.A.

(1926), Lettre à Louis de Broglie datant du 23 décembre 1926. Dossier « correspondance scientifique ».

Pauli, Wolfgang

(1939), Lettre à Jules Géhéniau datant du 10 janvier 1939. Boîte 26.

Schrödinger, Erwin



(1926), Lettre à Louis de Broglie datant du 23 mars 1926. Dossier « correspondance scientifique ».

**(Fond Proca) :**

Proca, Alexandre.

(1938), Sur la théorie du mésotron. Boîte 42bis.

(1942), Séminaire Fréchet. Boîte 42bis.

(1944), Brouillon d'une lettre destinée à Paul Langevin le 24 septembre 1944. Dossier « correspondance ».

(1947), Collège philosophique, sans titre. 1947.

(1954), Mémorandum, Le séminaire de physique théorique du C.N.R.S. Boîte 17.

(1947-1955), Papiers sur le séminaire de physique théorique. Boîtes 18 et 19.

(Non datée), Brouillon d'une lettre signée J. Perrin, E. Borel, L. de Broglie, Ch. Maurain, M. Brillouin, L. Brillouin, E. Picard et E. Le Roy et destinée à J. Cavalier. Dossier « correspondance ».

Dirac, Paul

(1936), Lettre à Alexandre Proca datant du 14 mars 1953. Dossier « correspondance ».

Michel, Louis

(1955), Lettre au directeur du CNRS datant du 26 septembre 1955. Boîte 17.

Pauli, Wolfgang

(1939), Lettre à Alexandre Proca datant du 10 octobre 1939. Dossier « correspondance ».

Rosenfeld, Léon

(1936), Lettre à Alexandre Proca non datée. Dossier « correspondance ».

Solomon, Jacques.

(1931), Lettre à Alexandre Proca datant du 16 décembre 1931. Dossier « correspondance ».

**(Fond Marcel Brillouin)**

Brillouin, Marcel

*Trente ans d'enseignement au Collège de France, 1900-1931, Résumé des leçons de chaque année scolaire.*

## **Archives de l'Institut Henri-Poincaré**

### **(Conférences) :**

Proca, Alexandre

(1934), Lettre à Mme Fournier datant du 26 Octobre 1934, dossier Bohr.  
Registres de la Bibliothèque.

## **Archives Nationales.**

(AJ 16), Création de l'Institut Henri Poincaré (carton AJ 16 5775<sup>2</sup>).

(F17), Dossier Louis de Broglie (carton F17/27953).

## **Archives personnelles de Gérard Petiau** (copies numérisées transmises par son fils Pierre Petiau)

(1942) Lettre de Louis de Broglie à Gérard Petiau datant du 28 Novembre 1942.

(1950) Notice sur les titres et travaux de Gérard Petiau.

## **Archives personnelles d'Alexandre Proca** (détenues par sa petite-fille Eliane Proca).

Born (1950), Lettre à Alexandre Proca, 13 juin 1950

Brillouin (1950), Lettre à Alexandre Proca. 8 mai 1950.

Proca (1950), Lettre à Max Born 21 mai 1950.

Prentki (1987), Lettre à George Proc, le 29 mai 1987.

Born, Max

(1925), Lettre à Albert Einstein datant du 15 juillet 1925. In Born, Einstein (1972), pp. 99-101.

Broglie, Louis de

(1929-A), Lettre à Albert Einstein datant du 29 janvier 1929. In Einstein (1989), p. 55.

(1929-B), Lettre à Albert Einstein datant du 14 novembre 1929. In Einstein (1989), p. 56.

Charles, Pierre, Cotton, Eugène, Lurçat, François

(1957), Physique ; quelques problèmes philosophiques, *Recherches internationales : à la lumière du Marxiste*. No. 4, 1957.

Einstein, Albert

(1924), Lettre à Paul Langevin datant du 16 décembre 1924, in Einstein (1989), pp. 172-173.

(1954), Lettre à Louis de Broglie datant du 15 février 1954, in Einstein (1989), pp. 60-61.

Langevin, Paul

(1924), Lettre à Albert Einstein datant du 13 janvier 1925, in Einstein (1989), pp. 173-174.

Le colloque de Caen,

(1957), *Les cahiers de la république*, 5, janvier-février 1957.

Mendès-France, Pierre,

(1957), Pour une Politique Nationale de la Recherche, in Le colloque de Caen (1957), pp. 28-33.

Pauli, Wolfgang

(1939), Lettre à Werner Heisenberg datant du 19 janvier 1934, In Pauli, Wolfgang (1985), *Scientific correspondence*, Vol. II, New-York, Springer, pp. 253-254.

Société des amis l'Université,

(1926-1968), *Les Annales de l'Université de Paris*, Bureau des renseignements scientifiques de l'Université de Paris.

### **III- Publications non-techniques des physiciens**

Bauer, Edmond

(1932), « Rapports entre la physique actuelle et la philosophie », in *Quatrième semaine internationale de synthèse, L'évolution de la physique et de la philosophie*, Paris, centre international de synthèse, Fondation « pour la science », 1935.

Bohr, Niels

(1938), « Le problème causal en physique atomique », in Union Internationale de Physique (1939), *Les nouvelles théories de la physique : réunion de Varsovie, 30 mai-3 juin 1938*, Institut International de Coopération Intellectuelle, pp. 11-48.

Borel, Emile

(1912), « Les théories moléculaires et les mathématiques », Conférence faite à Houston en 1912. Publiée dans les *Œuvres de Emile Borel*, tome 3, Paris, Editions du CNRS, 1972.

Brillouin, Léon

(1959), *Vie, matière et observations*, Paris, Albin Michel.

Brogie, Louis de

(1929-C), « Le déterminisme et la causalité dans la physique contemporaine », *Bulletin de la Société Française de Philosophie*, 29,4, pp. 371-390. (Discussion : Xavier Léon, Einstein, Borel, Hadamard, Langevin, Le Roy, Raymond Lenoir Disponible sur [<http://www.sofrphilos.fr/?idPage=34>]).

(1937-A), *La physique nouvelle et les quanta*, Paris, Flammarion (1973 pour la seconde édition).

- (1937-B), « Réflexions sur l'indéterminisme en physique quantique », in *Travaux du IXe congrès international de philosophie* (Congrès Descartes, 1-6 août 1937), Paris, Herman, pp. VII-3-VII-9.
- (1941-A), « Les conceptions de la physique contemporaine et les idées de Bergson sur le temps et le mouvement », in de Broglie (1947-B), pp. 191-211.
- (1941-B), *Continu et discontinu en physique moderne*, Paris, Albin Michel.
- (1941-C), « Théories abstraites et représentations concrètes dans la physique moderne », in de Broglie (1941-B), pp. 91-108.
- (1945), « Hasard et contingence en physique quantique », *Revue de Métaphysique et de Morale*, LV, pp. 241-252.
- (1947-A), « La vie et l'œuvre de Paul Langevin », in de Broglie (1951-A), pp. 233-269.
- (1947-B), *Physique et microphysique*, Paris, Albin Michel.
- (1947-C), « La liaison entre la science pure et ses applications », in de Broglie (1947-B), pp. 336-352.
- (1947-D), « Les révélations de la microphysique », in de Broglie (1947-B), pp. 123-162.
- (1949), « L'enseignement de la physique », *Revue de métrologie pratique et légale*, t IX, No. 1, pp. 5-10.
- (1951-A), *Savants et découvertes*, Paris, Albin Michel.
- (1952), « La physique quantique restera-t-elle indéterministe ? », conférence au Centre international de synthèse, le 31 octobre 1952. In de Broglie (1956-A), pp. 115-143.
- (1953-A), « vue d'ensemble sur mes travaux scientifiques », in George (1953), pp. 457-486.
- (1953-B), « La physique quantique restera-t-elle indéterministe ? », *Bulletin de la Société Française de Philosophie*, 47,3, pp. 449-489. (Discussion : Bachelard, Salzi, Bauer, Ullmo, Bénézé, Raymond Lenoir, Jean Wahl, Destouches, André Metz. Disponible sur [<http://www.sofrphil.fr/?idPage=34>]).
- (1954), « Interprétation nouvelle de la mécanique ondulatoire ». In (1956-A), pp. 144-154.
- (1956-A), *Nouvelles perspectives en microphysique*, Paris, Flammarion.
- (1956-B), « Pierre Duhem, sa vie, son œuvre », in de Broglie (1956-A), pp. 317-327.
- (1956-C), « L'interprétation de la Mécanique ondulatoire », in de Broglie (1956-A), pp. 203-231.
- (1960), « Hommage à la mémoire d'Emile Meyerson », in de Broglie (1966-A), pp. 237-244.
- (1961), « Mon anxiété devant le problème des quanta », in de Broglie (1966-A), pp. 13-22.
- (1966-A), *Certitudes et incertitudes de la Science*, Paris, Albin Michel.
- (1966-B), « Les idées qui me guident dans mes recherches », in de Broglie (1966-A), pp. 44-65.
- (1966-C), « Les représentations concrètes en microphysique », in de Broglie (1966-A), pp. 23-43.

Broglie, Maurice de

- (1953), « La jeunesse et les orientations intellectuelles de Louis de Broglie », in George (1953), pp. 423-429.

Costa de Beauregard, Olivier

- (1963), *La notion de temps, équivalence avec l'espace*, Paris, Hermann.

Dirac, P.A.M.

- (1983), « The origin of quantum field theory », in Brown, L.M., Hoddson, L. (1983). *The Birth of Particle Physics*, Cambridge University Press, pp. 39-55

Einstein, Albert

(1933), « Sur la méthode de la physique théorique », in Einstein (1979), *comment je vois le monde*, Champs Flammarion, Paris 1979, p. 129

Heisenberg, Werner

(1953), « Remarques sur la théorie neutrinienne de la lumière », in George (1983).

Joliot-Curie, Irène et Frédéric

(1953), « La mécanique ondulatoire et le noyau », in George (1953), pp. 209-214.

Joyeux, Jean-Pierre

(1956), « A propos de la lutte idéologique en Physique », in *La nouvelle critique*, 76, p. 103.

Juvet, Gustave

(1934), « La théorie des groupes et la physique des champs », *Revue Générale de l'Electricité*, 36, pp. 147-160 et 192-199.

Korner, S

(1957), *Observation and Interpretation. A Symposium of Philosophers and Physicists*, Proceedings of the Ninth Symposium of the Colston Research Society held in the University de Bristol, April 4th, London, Butterwoths scientific publications, 1957.

Langevin, Paul

(1929), « L'orientation actuelle de la physique », in Langevin (2007), pp. 199-226.

(1933), « La notion de Corpuscule et l'Atome », in Langevin (2007), pp. 253-300.

(1935), « Statistique et déterminisme », in *La Statistique, ses applications, les questions qu'elles soulèvent*, Paris, PUF, 1944, pp.245-300.

(1945), « Matérialisme mécaniste et matérialisme dialectique », *La pensée* No. 12, 1947 pp, 8-12.

Reproduction du discours prononcé par P. Langevin le 10 juin 1945 au Palais de Chaillot, lors de la séance inaugurale de l'Encyclopédie de la Renaissance française.

Solomon, Jacques

(1945), « Gaston Bachelard et le nouvel esprit scientifique », *La Pensée* (nouvelle édition), I, pp. 47-55. (Texte retrouvé dans ses papiers et publié après sa mort).

Ullmo, Jean

(1955), « La crise de la physique quantique », Paris, Hermann.

Vassails, Gérard

(1953), « Louis de Broglie et l'indéterminisme physique », in *La Nouvelle critique*, No. 43, pp. 129-137.

## IV- Publications techniques des physiciens

Balkanski, M

(1958), « État actuel du problème de l'exciton », *Journal de Physique et le Radium*, Vol 19, No. 2, pp. 170-182

Bauer, Edmond

(1913), *Recherches sur le rayonnement*, Thèse de doctorat ès-sciences, Gauthier-Villars, Paris.

Bauer, Edmond, London, Fritz,

(1939), *La théorie de l'observation en mécanique quantique*, Paris, Hermann, 1939.

Birtwistle, George

(1927), *The new quantum mechanics*, Cambridge University Press.

Bloch, Eugène

(1930), *L'ancienne et la Nouvelle Théorie des Quanta*, Paris, Hermann.

Bloch, Léon

(1918), « Quelques récents progrès de la physique (1914-1918) », *Revue générale des sciences*, mars. pp.166-175, avril, pp. 198-208.

Bohm, David,

(1952-A). « A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden Variables" I », *Physical Review* 85, pp. 166–179.

(1952-B). « A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden Variables" II », *Physical Review* 85, pp. 180–193.

Bouchez, R, Nataf, R,

(1952, 1953), « Sur les transitions  $\beta$  et la structure nucléaire. I, II et III », *Journal de Physique et le Radium*, Vol.13, No. 2, 1952, pp81-83 ; Vol.13, No. 4, 1952, pp190-199 ; Vol. 14, No. 4, 1953, pp217-225.

Brillouin, Léon

(1922), « Diffusion de la lumière et des rayons X par un corps transparent homogène. Influence de l'agitation thermique », *Annales de Physique*. 17, pp. 88-122

(1923), *La théorie des quanta et l'atome de Bohr*, Paris, Presses Universitaires, 1923.

(1924), « Les lois de l'élasticité en coordonnées quelconque », in *Congrès international de mathématiques tenu à Toronto en 1924*. vol.2, Toronto, University of Toronto Press, pp. 73-97.

(1926-A), « Les spectres de rotation dans la nouvelle mécanique », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*, T 182, p. 374.

(1926-B), « La nouvelle mécanique atomique », *Journal de Physique et le Radium*, Vol 7, No 5, p. 135.



- (1926-C), « Remarques sur la Mécanique ondulatoire », *Journal de Physique et le Radium*, Vol 7, No 12, p. 353.
- (1927), « Les moments de rotation et le magnétisme dans la mécanique ondulatoire », *Journal de Physique et le Radium* Vol. 8 No. 2. p. 74.
- (1930), « Les électrons libres dans les métaux et le rôle des réflexions de Bragg », *Journal de Physique et le Radium* Vol. 1, No. 11, p377.
- (1932-A), *Notions de la Mécanique Ondulatoire, les Méthodes d'Approximations*, Paris, Hermann.
- (1932-B), « Les problèmes de perturbations et les champs self-consistants », *Journal de Physique et le Radium*, Vol 3, No 9, pp. 373-389

Brillouin, Marcel

- (1919), « Actions mécaniques à hérédité discontinue par propagation ; essai de théorie dynamique de l'atome à quanta », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*, T.168. pp. 1318-320.

Brogie, Louis de

- (1920-A), « Sur le calcul des fréquences limites d'absorptions K et L des éléments lourds », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*, séance du 8 mars 1920, T.170. pp. 585-587.
- (1920-B), « Sur le modèle d'atome de Bohr et les spectres corpusculaires », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*, séance du 21 mars 1921, T.170. pp. 585-587.
- (1921), « Sur la théorie de l'absorption des rayons X par la matière et le principe de correspondance ». *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*, séance du 27 décembre 1921, T.173. pp. 1456-1458.
- (1922-A), « Rayons X et équilibre thermodynamique », *Journal de Physique et le Radium*, 3, 2. pp ; 33-45.
- (1922-B), « Rayonnement noir et quanta de lumière », *Journal de Physique et le Radium*, 3, 11. pp. 422-428. (1922-C), « Sur les interférences et la théorie des quanta de lumière », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*. T.175. pp. 811-813.
- (1923-A), « Onde et quanta », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*, séance du 10 Septembre 1923. T.177. pp 507-510.
- (1923-B), « Quanta de lumière, diffraction et interférences », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*. 1923. T.177, pp 548-560.
- (1923-C), « Les quanta, la théorie cinétique des gaz et le principe de Fermat », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*. T.177 (1923). pp. 630-632.
- (1924), « Recherches sur la théorie des quanta », *Annales de physique*, Tome III, Janvier-Février 1925.
- (1924-B), « A tentative theory of light quanta », *Philosophical Magazine*, 47, pp. 446-458.
- (1925), « Sur la fréquence propre de l'électron », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*. T.179, pp. 1039-1041.
- (1927-A), « La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière », *Journal de Physique et le Radium*, Vol 8, n°5, pp. 225-241.
- (1930), « Introduction à l'étude de la mécanique ondulatoire », Paris, Hermann.
- (1932-A), « Sur une analogie entre l'électron de Dirac et l'onde électromagnétique », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*. T.195, pp. 536-537
- (1932-B), « Sur le champ électromagnétique de l'onde lumineuse », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*. T.195, pp. 862-864.

(1934), *L'électron magnétique*, Paris, Hermann.

(1940), *Une nouvelle théorie de la lumière, Tome premier*, Paris, Hermann.

(1942-A), « Sur la propagation de l'énergie lumineuse dans les milieux anisotropes », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*. T.215, pp. 153-156.

(1944), « Sur la nature du photon », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*, T.198, pp. 135-138.

(1946-A), « Sur un effet limitant les possibilités du microscope corpusculaire », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*. T.222, pp. 1017-1019.

(1943-A), *Théorie générale des particules à spin*, Paris, Gauthier-Villars.

(1951-B), *Problèmes de propagations guidées des ondes électromagnétiques*, Paris, Gauthier-Villars.

(1951-C), « Remarque sur la théorie de l'onde pilote », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*. T.233. pp. 641-644.

(1951-D), « Remarque sur la note précédente de M. Vigier », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*. T.233. pp 1012-1013.

(1957), *Mécanique ondulatoire du photon et théorie quantique des champs*, Paris, Gauthier-Villars.

(1957-B), *La théorie de la mesure en mécanique ondulatoire*, Paris, Gauthier-Villars.

(1964), *La Thermodynamique de la particule isolée*, Paris, Gauthier-Villars.

(1982), *Les incertitudes d'Heisenberg et l'interprétation probabiliste de la mécanique ondulatoire*, Paris, Gauthier-Villars.

Broglie, Louis de, Dauvillier, Alexandre,

(1921), « Sur la structure électronique des atomes lourds », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*, séance du 27 juin 1921, T.172. pp. 1650-1653.

(1922), « Sur le système spectral des rayons Röntgen », *Note aux comptes rendus de l'Académie des sciences*, séance du 23 Octobre 1922, T.175 (1922), pp. 685-688.

Broglie, Maurice de

(1908), « *Recherches sur les centres électrisés de faible mobilité dans les gaz* », Paris, Gauthier-Villars.

Cloizeaux, Jules des

(1955), « Bandes interdites et bandes permises dans les semi-conducteurs impurs et les alliages désordonnés », *Journal de Physique et le Radium*. Vol 16, No. 4, pp. 320-324.

Conseil Solvay,

(1928), *Electrons et photons, Rapports et discussions du Conseil de physique tenu à Bruxelles du 24 au 29 Octobre 1927*, Paris, Gauthier-Villars.

Destouches, Jean-Louis

(1933), *Recherches sur les mécaniques ondulatoires et la superquantification en vue d'une mécanique générale*, Paris, Masson.

(1934), « Définition et propriétés du centre de gravité en mécanique ondulatoire », *Journal de physique et le radium*, Vol. 5. No 7. pp. 320-328.

(1935), « Théorie du centre de gravité en mécanique ondulatoire et applications », *Journal de physique et le radium*, Vol. 6. No 8. pp. 329-335.

(1936), « Lois générales d'évolution d'un système physique », *Journal de physique et le radium*, Vol. 7 No. 7, pp. 305-311.

(1936-B), « Le principe de relativité et la théorie générale de l'évolution d'un système physique », *Journal de physique et le radium*, Vol. 7 No. 10, pp. 427-433.

(1939), *Physique moderne et philosophie*, Paris, Hermann.

(1943), *Principes fondamentaux de la physique théorique*, Paris, Hermann.

(1947), « La théorie physique et ses principes fondamentaux », *Bulletin de la Société Française de Philosophie*, 42,1, pp. 419-449. (Discussion : E. Bauer, R. Bayer, J. Benda, G. Bouligand, E. Bréhier, M. Cazin, P. Césari, Mme P. Destouches-Février, J. Hyppolite, Mme Lévy-Strauss, A. Metz, J. Ullmo, Ed. Wolff. Disponible sur [<http://www.sofrphil.fr/?idPage=34>]).

Dirac, P.A.M.

(1927), «The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation », *Proc. R. Soc. Lond. A*, 114, pp. 243-265.

Elsasser, Walter

(1933), « Sur le principe de Pauli dans les noyaux », *Journal de Physique et le Radium*, Vol. 4, No10, pp. 549-556.

Einstein, Albert

(1909), « Zum gegenwertigen Stand der Strahlungs Problem». *Physikalische Zeitschrift*, 10, (1909), p. 185.

Einstein, Albert, Grommer, J.

(1927). « Allgemeine Relativitätstheorie und Bewegungsgesetz ». *Sitzungsb. Preuss. Akad. Wiss.*, KI, pp. 2-13

Goldstein, Louis

(1929), « Sur la distribution de l'intensité dans la structure fine de l'hydrogène », *Journal de Physique et le Radium*. Vol. 10. No 12, pp. 439-447.

(1930), « Sur le traitement relativiste de l'atome à plusieurs électrons », Vol. 1, No 8, pp. 271-284.

(1933-A), « Sur la théorie des spectres continus de la molécule d'hydrogène », *Journal de Physique et le Radium* Vol. 4 No. 1, pp. 44-53.

(1933-B), « Sur les processus de dissociation photochimique élémentaires », *Journal de Physique et le Radium*, Vol. 4 No. 3, pp. 123-131.

(1936), « Sur la théorie de la désintégration radioactive alpha », *Journal de Physique et le Radium*, Vol. 7 No. 12, pp. 527-532.

Gourdin, M, Jancovici, B., Verdet, L.

(1958), « On the nucleon-antinucleon interactions », *Il Nuovo Cimento*, Vol 8, No. 3, pp. 485-496.

Heitler, Walter

(1936), *The quantum theory of radiation*, Oxford University Press.

Heitler, Walter, London, Fritz,

(1927), *Zeitschrift für Physik*, Vol. 44, p. 455.

Heisenberg, Werner, Pauli, Wolfgang,

(1929). *Z. Physik.*, Vol. 56 p1 et Vol. 59 p. 168.

Herpin, André

(1953), « Forces interioniques dans les métaux », *Journal de Physique et le Radium*. Vol. 14, No 5, pp. 349-350.

Horowitz, Jules, Messiah, Albert

(1953), « Sur les réactions (dp) et (dn) », *Journal de Physique et le Radium*, Vol.14, No. 12, pp. 695-706.

(1953), « Les corrélations angulaires (dp $\gamma$ ) et la théorie du « stripping » », *Journal de Physique et le Radium*, Vol.15, No. 3, pp. 142-144.

Jean, Maurice, Prentki, Jacques

(1950), «La section efficace de diffusion nucléon-nucléon dans la théorie super-multi-temporelle». *Journal de Physique et le Radium*, Vol. 11, No. 1, pp. 33-44

Kramers, H.A.

(1923), « On the theory of X-Ray Absorption and of the Continuous X-Ray Spectrum », *Philosophical Magazine*, 46. pp. 836-870.

Kwall, Bernard

(1934), «La théorie des équations de Maxwell et le calcul des opérateurs matriciels », *Journal de Physique et le Radium*, Vol. 5 No. 8, pp. 445-448.

(1936), « Demi-vecteurs et tenseurs », *Journal de Physique et le Radium*, Vol. 7 No. 5, pp. 223-226.

(1937), « Sur la description spatio-temporelle des phénomènes quantiques », *Journal de Physique et le Radium*, Vol. 8 No. 3. pp. 81-87.

Marty, Claude, Prentki, Jacques

(1948), « Sur la désintégration du méson », *Journal de Physique et le Radium*. Vol. 9, No.4, pp. 147-149.

(1949), « La mésodésintégration du deutéron », *Journal de Physique et le Radium*. Vol. 10, No.5, pp. 156-164.

Messiah, Albert

(1958), *Mécanique quantique*, 2 tomes, Paris, Dunod (1969, nouveau tirage).

Oppenheimer, J.R.

(1930), *Physical Review*, Vol. 35, p. 461.

Petiau, Gérard

(1934), « Sur la théorie des transformations nucléaires et la classification des éléments légers », *Journal de Physique et le Radium*, Vol.5, No.8, pp. 426-430.

(1938), « La représentation des ondes planes monochromatiques solutions de l'équation de Dirac », *Journal de Physique et le Radium*, Vol. 9 No. 5, pp. 171-177.

(1939), « Sur la représentation de l'équation d'ondes et l'évolution des grandeurs électromagnétiques dans la théorie du photon », *Journal de Physique et le Radium*, Vol. 10, No. 9, pp. 413-419.

(1954), « Quelques cas de représentation des corpuscules en interaction avec des champs extérieurs dans la nouvelle forme de la mécanique ondulatoire (Théorie de la double solution) », *Séminaire Louis de Broglie. Théories physiques*, tome 24 (1954-1955), No 18 pp. 1-13

Proca, Alexandre

(1928), « Interférence et quanta de lumière », *Journal de Physique et le Radium*, Vol 9, No 2, pp73-79.

(1929), « L'équation de Schrödinger et l'énergétique », *Journal de Physique et le Radium*, Vol. 10 No. 1, pp. 1-14.

(1932), « Sur une explication possible de la différence de masse entre le proton et l'électron », *Journal de Physique et le Radium*, Vol. 3, No.2, pp. 83-101.

(1934-A), « Ondes et photons - I. approximation de Schrödinger », *Journal de Physique et le Radium*, Vol. 5 No. 1, pp6-19.

(1934-B), « Ondes et photons - II. Approximation de Pauli », *Journal de Physique et le Radium*, Vol. 5 No. 3, pp. 121-125.

(1934-C), « Ondes et photons - III. Approximation de Dirac », *Journal de Physique et le Radium*, Vol. 5, No. 4, pp. 157-166.

(1936), « Sur la théorie ondulatoire des électrons positifs et négatifs », *Journal de Physique et le Radium*, Vol.7, No. 8, pp . 337-353.

Rosenfeld, Léon, Solomon, Jacques

(1931), « Sur la théorie quantique du rayonnement », *Journal de Physique et le Radium*, Vol 2, No 5, pp. 139-147.

Rutherford and al.

(1929), « Discussion on the Structure of Atomic Nuclei », *Proc. R. Soc. Lond. A* 123, pp. 373-390.

Solomon, Jacques

(1931), *L'électrodynamique et la théorie des quanta*, Paris, Masson & Cie.

(1932), « Sur quelques difficultés de la théorie des quanta », *Journal de Physique et le Radium*, Vol 2, No 10, p. 321-341.

(1933), « Sur l'interaction entre proton et neutron », *Journal de Physique et le Radium*, Vol 4. No 4, 1933, pp. 210-220.

(1936), « Les désintégrations nucléaires provoquées par les rayons cosmiques », *Journal de Physique et le Radium*, Vol 7, No 2, pp. 71-76.

Ullmo, Jean

(1929), « Théorie des sauts quantiques », *Journal de Physique et le Radium*, Vol 10. No 1, pp. 15-31

Seitz, Frederick

(1940), *The modern theory of Solids*, McGraw-Hill.

Von-Neumann, John

(1932), *Les fondements mathématiques de la mécanique quantique*, Traduit en Français par Alexandre Proca, (1946), Paris, Alcan.

Winter, Jacques

(1933-A), « Les équations avec hamiltoniens dépendant du temps et les phénomènes de résonance en mécanique ondulatoire », *Journal de Physique et le Radium*, Vol 4, No 3, pp. 132-137.

(1933-B), « La diffusion des électrons et la répartition des flux », *Journal de Physique et le Radium*, Vol. 4 No. 6, pp. 316-323.

## V- Entretiens et témoignages

Abragam, Anatole

(1989), *De la physique avant toute chose*. Paris, Odile Jacob.

(2000), *De la physique avant toute chose*. Paris, Odile Jacob. (De nombreuses modifications ont été apportées entre les deux versions).

Balian, Roger

(2010), « Mon parcours quantique », in Dars, Papillault (2010), *Le plus grand des hasards*, Paris, Belin, pp. 104-108.

Bauer, Edmond

(1963), Interview of E. Bauer by T.S. Kuhn and T. Kahan on January 8, 1963, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA.

[[http://www.aip.org/history/ohilist/4498\\_1.html](http://www.aip.org/history/ohilist/4498_1.html)]

Blackett, P. M. S.

(1933) « The Craft of Experimental Physics' », in H. Wright (ed.), *Cambridge University Studies*. London, Nicholson and Watson, pp. 67—96.

Brillouin, Léon

(1962), Interview of L. Brillouin by P.P. Ewald on March 29, 1962, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA.

[[http://www.aip.org/history/ohilist/4538\\_1.html](http://www.aip.org/history/ohilist/4538_1.html)]

D'Espagnat, Bernard



(2001), Interview of B. d’Espagnat by O. Freire on October 26, 2001, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA.

Datzeff, Assène

(1988), « Louis de Broglie », in Collectif (1988), pp. 49-51.

Daudel, Raymond

(1988), « Louis de Broglie, mon maître », in Collectif (1988), pp. 53-56

Destouches, Jean-Louis

(1953), « Retour sur le passé », in George (1953), pp. 67-85.

Dirac, P.A.M.

(1962), Interview of P.A.M. Dirac by T.S. Kuhn and E.P. Wigner on April 1, 1962, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA.

[[http://www.aip.org/history/ohilist/4575\\_1.html](http://www.aip.org/history/ohilist/4575_1.html)]

Elsasser, Walter

(1962), W. Elsasser by J.L. Heilbron on May 9, 1962, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA.

[<http://www.aip.org/history/ohilist/4590.html>]

(1978), *Memoirs of a Physicist in the Atomic Age*. Bristol, Adam Higger.

Feynman, Richard

(1965), *Nobel Lecture*, December 11, 1965.

[[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1965/feynman-lecture.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1965/feynman-lecture.html)]

Friedel, Jacques

(1994), *Graine de Mandarin*, Paris, Editions Odile Jacob.

(2011), Entretien réalisé le 06/03/2011.

Gennes, Pierre-Gilles de

(1988), « Deux souvenirs d’étudiants », in Collectif (1988), pp. 73-74.

Heisenberg, Werner

(1993), *La partie et le tout*, Paris, Flammarion.

Kleman, Maurice

(2011), Entretien réalisé le 10/06/2011.

Langevin, Jean

(1962), J. Langevin by T.S. Kuhn and T. Kahan on November 11, 1963, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA.

Lévy, Maurice

(2011), Entretien réalisé le 22/09/2011.

Lochak, Georges

(2011), Entretien réalisé le 25/01/2011.

Lurçat, François

(2011), Entretien réalisé le 06/03/2011.

Martin, André

(2011), Entretien réalisé le 25/05/2011.

Mauguin, Charles,

(1953), « La thèse de doctorat de Louis de Broglie », in George (1953), pp. 430-436.

Massey, Harrie

(1984), « Research at the Cavendish 1932 », in Hendry (1984), pp. 95-99.

Messiah, Albert

(1982) « La physique des particules en France après la seconde guerre mondiale (1945-1960) », *Journal de physique*, Colloque C8, supplément au n°12, Volume 43, décembre 1982, p341.

(1984), Entretien avec Stéphane Deligeorges, in Deligeorges (1984), *Le monde quantique*, Paris, Seuil, pp. 109-120.

Morette-DeWitt, Cécile

(2011), Entretien réalisé le 10/10/2011.

Mott, Nevill

(1984), «Theory and Experiment at the Cavendish circa 1932», in Hendry (1984), pp125-132.

Néel, Louis

(1991), *Noces de diamant avec l'atome*, Paris, Flammarion.

Pecker, Jean-Claude

(1991), « A tribute to Vigier », in, *Apeiron*, No. 9, pp 1-3

Ullmo, Jean

(1963), Interview of J. Ullmo by T.S. Kuhn and T. Kahan on January 7, 1963, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA.

[<http://www.aip.org/history/ohilist/4923.html>]

Rocard, Yves

(1988), *Mémoires sans concession*. Paris, Grasset.

Rosenfeld, Léon

(1963), Interview of L. Rosenfeld by T.S. Kuhn and J.L. Heilbron on July 1, 1963, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA.  
[[http://www.aip.org/history/ohilist/4847\\_1.html](http://www.aip.org/history/ohilist/4847_1.html)]

Teillac, Jean

(1987), Entretien avec Jean-François Picard, 2 Octobre 1987.  
[<http://www.histcnrs.fr/archives-oraales/teillac.html>].

Weisskopf, Victor

(1951), « Physics in France », in *Physics today*, december 1951, pp 6-11.

## VI- Littérature secondaire

Atten, Michel

(1995), « La physique en souffrance. 1859-1914 », in Belhoste et al. *La formation polytechnicienne 1794-1994*, Paris, Dunod. pp. 217-244.

Bachelard, Gaston

(1934), *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, Éditions Alcan.

Bantigny, Ludivine, Baruch, Pierre

(2002), « Les semiconducteurs au laboratoire de physique de l'ENS : Genèse et développement des semi-conducteurs : 1948-1965 », *Bulletin de la Société française de physique*, No.136, octobre 2002, pp. 4-11.

Barreau, Hervé, Février, Paulette, Lochak, George

(1994), *Destouche. Physicien et Philosophe*, Paris, CNRS éditions.

Belhoste, Bruno

(1994), « Un modèle à l'épreuve. L'Ecole polytechnique de 1794 au Second Empire », in Belhoste et al (1994). *La formation polytechnicienne 1794-1994*, Paris, Dunod, pp. 9-30.

Belhoste et al.

(1994), *La formation polytechnicienne 1794-1994*, Paris, Dunod.

Ben-David, Joseph

(1970), «The Rise and Decline of France as a Scientific Centre», *Minerva*, VIII, 2 (April 1970), pp. 160-179.

Bensaude-Vincent, Bernadette

(1987), *Langevin. Science et vigilance*, Paris, Belin.

(1984), « France, un accueil difficile », In Deligeorges (1984), pp. 67-80.

Besson, Virgile

(2011), *Les premiers travaux de Jean-Pierre Vigier sur la théorie des quanta : une rencontre entre science et marxisme (1951-1954)*, Mémoire de Master, Université Lyon 1.

Bienzanski, Michel

(1983), *La diffusion de la théorie de la relativité en France*, Thèse de doctorat, Université Paris VII.

Bitbol, Michel

(1996), *Mécanique quantique, une introduction philosophique*, Paris, Flammarion.

(2001), « Jean-Louis Destouches : théories de la prévision et individualité », *Philosophia Scientiae*, 5, pp 1-30.

Born, Max, Einstein, Albert,

(1972), *Correspondance 1916-1955*. Paris, Seuil, pour la traduction française.

Bustamente, Matha Cecilia

(1997), « Jacques Solomon (1908-1942) : Profil d'un physicien théoricien dans la France des années trente », *Revue d'histoire des sciences*, 50, pp. 49-87.

(2002), « Rayonnement et quanta en France, 1900-1914 », *Physis*, vol XXXIX, fasc.1 pp. 63-107

Camilleri, Kristian

(2009), « Constructing the Myth of the Copenhagen Interpretation », *Perspectives on Science*, Vol. 17, No. 1, pp. 26-57.

Colin, Cécile

(2010), « Jacques Solomon et l'interprétation de la théorie quantique », *Revue d'histoire des sciences*, 63, 1, pp. 221-246.

Collectif,

(1988), *Louis de Broglie que nous avons connu*, Paris, Fondation Louis de Broglie.

Collectif,

(1994), *La découverte des ondes de matière*, Actes de colloque, Paris, Lavoisier Tec&Doc.

Colloque de Cordoue,

(1980), Actes du colloque, publiés sous le titre *Science et conscience. Les deux lectures de l'Univers*. Paris, Stock et France-Culture.

Connes, Alain

(2000), *Triangle de pensée*, Paris, Odile Jacob.

Cross, A

(1991), « The Crisis in Physics: Dialectical Materialism and Quantum Theory », *Social Studies of Science*, 21, pp. 735–759.

Darrigol, Olivier

(1984), « La genèse du concept de champ quantique », *Annales de Physique*, Vol. 9, n° 3, pp. 433-501

(1989), « Brillouin, Léon », *Dictionary of scientific biography*, Supplément 2, pp. 224-233.

(1993), « Stangeness and soudness in the de Broglie's early works », *Physis* 30, pp. 303–372.

(1993), *From c-Numbers to q-Numbers : The Classical Analogy in the History of Quantum Mechanics*. University of California Press.

Durand-Delga, Michel

(1961), *Paul Fallot (1889-1960), sa vie, son œuvre : un portrait*, Paris, Société géologique de France.

Einstein, Albert

(1979), *Comment je vois le monde*, Paris, Flammarion.

(1989), *Correspondances françaises*, Paris, Seuil.

Forman, Paul, Raman, V.V.

(1969), « Why was it Schrodinger who developed de Broglie's Ideas ? », *Historical Studies in the Physical Sciences*, Vol 1. pp. 291-314.

Freire Junior, Olival

(1993), « L'interprétation de la mécanique quantique selon Paul Langevin », *La Pensée*, n°292, pp. 117-134.

(2003), « Science and Exile: David Bohm, the Hot Times of the Cold War, and His Struggle for a New Interpretation of Quantum Mechanics », *Historical Studies on the Physical and Biological Sciences*, vol. 36, No. 1, pp. 31–35.

Gavrolu, K., Simoes, A,

(2002), « Preparing the ground for quantum chemistry in Great Britain: the work of the physicist R.H. Fowler and the chemist N.V. Sidgwick », *The British Journal for the History of Science*, 35, pp. 187–212.

George, André,

(1953), *Louis de Broglie, physicien et penseur*, Paris, Albin Michel.

Grimoult, Cédric

(2008), *Science et politique en France*, Paris, Ellipses.

Guthleben, Denis

(2009), *Histoire du CNRS de 1939 à nos jours*, Paris, Armand Colin.

Hecht, Gabrielle

(2004), *Le rayonnement de la France : Énergie nucléaire et identité nationale après la Seconde Guerre mondiale*, Paris, La Découverte.

Hendry, John (éd.)

(1984), *Cambridge Physics in the Thirties*, Bristol, Adam Hilger Ltd.

Hermann, A, Krige, J, Mersits, U, Pestre, D,

(1987), *History of CERN*. Vol. 1, North-Holland.

Hoch, Paul K.

(1983), « The reception of central European refugee physicists of the 1930s : URSS, UK, USA », *Annales of Science*, Vol. 40, pp. 217-246.

Hoddeson et al,

(1992), *Out of the Crystal Maze: Chapters from the History of Solid-State Physics*, Oxford University Press.

Hughes, Jeff

(1998), « 'Modernists with a Vengeance' : Changing Cultures of Theory in Nuclear Science, 1920-1930 », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Vol. 29, No. 3, pp. 339-367.

Jammer, Max

(1974), *The philosophy of quantum mechanics*, New-York, John Wiley & sons.

Jungnickel, Christa, McCormmach, Russell

(1986), *Intellectual mastery of nature, vol 2*, Chicago, the University of Chicago Press.

Kojevnikov, Alexei, Novik, O.I.

(1989), « Analysis of informational ties dynamics in early quantum mechanics », *Acta historie rerum naturalium necnon technicarum*, n°20. pp. 115-160

Kojima, Chieko

(2001), « Que pensait vraiment Langevin de la thèse de Louis de Broglie ? » *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, Volume 26, numéro spécial, pp. 241-247.

Kragh, Helge

(1990), *Dirac, a scientific biography*, Cambridge, Cambridge University Press.

(1999), *Quantum generations*, Princeton, Princeton University Press.

Lacki, Jan

(2004), « The puzzle of canonical transformations in early quantum mechanics », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Vol. 35, pp. 317-344.

Laloë, Franck.



(1984), « La mécanique quantique à l'ordinaire du physicien », in Deligeorges (1984), pp. 183-199.

Langevin, Paul

(2007), *Propos d'un physicien engagé*, Paris, Vuibert.

Lochak, Georges

(1992), *Louis de Broglie*, Paris, Champs Flammarion.

(2004), Louis de Broglie sa conception du monde physique, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, Volume 29, Hors série 1, pp749-765

Maiocchi, Roberto

(1975), « Paul Langevin's epistemological considerations on quantum mechanics and the reactions to them in French culture before World War II », *Scientia* 110, pp. 493-518.

Mehra, Jagdish, Rechenberg, Helmut

(2001), *The historical development of Quantum Theory, Volume 6*, New-York, Springer.

Meyerson, Emile

(1925), *La déduction relativiste*, Paris, Payot.

(1933), *Réel et déterminisme dans la physique quantique*, Hermann, Paris.

Mosseri, Rémy

(1999), *Léon Brillouin, à la croisée des ondes*, Paris, Belin.

Navarro, Jaume

(2009), « "A dedicated missionary". Charles Galton Darwin and the new quantum mechanics in Britain », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*. Vol. 40, pp316-326.

(2010), « Electron diffraction chez Thomson: early responses to quantum physics in Britain », *The British Journal for the History of Science*, 43. pp. 245–275

Nye, Mary Joe

(1997), « Aristocratic Culture and the Pursuit of Science. The De Broglies in Modern France », *Isis*, Vol. 88, pp. 397-421.

Omnès, Roland

(2002), « Edmond Bauer et la conscience de l'observateur en mécanique quantique », in *Epistémologiques, Paul Langevin, son œuvre et sa pensée. Science et engagement*. Vol 2 janvier-juin 2002, pp 171-176

Pais, Abraham

(1986), *Inward Bound*, New-York, Oxford University press.

Pange, Comtesse de

(1962, 1965, 1968), *Comment j'ai vu 1900*, Paris, Grasset.

Passos Videiras, A.A., Santos Fitas, A.J. dos

(2007), « Guido Beck, Alexandre Proca, and the Oporto Theretical Physics Seminar », *Physics in perspective*, Vol.1, No.1, pp. 4-25.

Paty, Michel

(1988), « sur le style de recherche de Louis de Broglie », in Collectif (1988), pp. 163-168.

Paul, Harry W.

(1985) *From knowledge to power, the rise of the science empire in France*, Cambridge, Cambridge University Press.

Pestre, Dominique

(1984), *Physique et physiciens en France 1918-1940*, deuxième édition, 1992, Paris, éditions des archives contemporaines.

(1985), « Y a-t-il eu une physique à la française entre les deux guerres ? », *La recherche*, 169 septembre 1985, pp. 999-1005.

(1992), « Les physiciens dans les sociétés occidentales de l'après-guerre. Une mutation des pratiques techniques et des comportements sociaux et culturels », *Revue d'histoire moderne et Contemporaine*, 39-1, janvier-mars, 56-72.

(1994-A), « Le renouveau de la recherche à l'Ecole polytechnique et le laboratoire de Louis Leprince-Ringuet, 1936-1965 », in Belhoste et al. (1994), pp. 333-356.

(1994-B), « La création d'un nouvel univers physicien, Yves Rocard et le laboratoire de physique de l'Ecole Normale Supérieure, 1938-1960 », in J.F. Sirinelli. *Le Livre du Bicentenaire de l'Ecole Normale Supérieure*, Paris, PUF, pp. 405-422

(2003), *Science, argent et politique*. Paris, INRA.

Picard, Jean-François

(1990), *La république des savants*, Paris, Flammarion.

Pinault, Michel

(2000), *Frédéric Joliot-Curie*, Paris, Odile-Jacob.

Principe, Joao

(2008), *La réception française de la mécanique statistique*, Thèse de doctorat, Université Paris Diderot, Universidad de Evora.

Proca, Alexandre

(1988), *Œuvre scientifique publiée*, Paris, Georges A. Proca.

Russo, Arturo

(1994), « La découverte des ondes de matière », in Collectif (1994). pp. 79-91.

Savoie, Philippe

(2009), « L'université impériale, le corps enseignant et l'institution scolaire publique. Origines et postérité d'une fondation ambiguë », in Armelle Le Goff (dir.), *Les hommes et les femmes de l'Université. Deux siècles d'archives*, Paris, Archives nationales. pp. 11-22.

Schweber, S.S.

(1986) « The empiricist temper regnant : Theoretical physics in the United States 1920-1950 », *Historical Studies in the Physical Sciences*, 17. pp. 55-98.

(1994), *QED and the men who made it*, Princeton University Press.

Seth, Suman

(2010), *Crafting the quantum : Arnold Sommerfeld and the practice of theory, 1890–1926*. Cambridge, MA: MIT Press.

Shinn, Terry

(1979) « The french science faculty system, 1808-1914 : institutional change and research potential in mathematics and the physical sciences », *Historical Studies in the Physical Sciences*, 10, pp; 271-332.

Siegmund-Schultze, Reinhard

(2009), « The Institute Henri Poincaré and mathematics in France between the wars », *Revue d'Histoire des sciences*, T.62-1, janvier-juin, pp. 247-283

Ullmo, Jean

(1969), *La pensée scientifique moderne*, Paris, Flammarion.

Vila Valls, Adrien

(2009), *Louis de Broglie et le conflit des interprétations en mécanique quantique*, Mémoire de master, Université Lyon 1.

Weart, Spencer

(1992), « The Solid Community », in Hoddeson et al, pp. 617-669.

Wheaton, Bruce R.

(1983), *The tiger and the shark*, Cambridge University Press.

(1994), « *The laboratory of Maurice de Broglie and the empirical foundations of matter-waves* », in Collectif (1994), pp. 25-39.

Witkowski, Nicolas

(1997), « Bernard d'Espagnat, le physicien du réel voilé », in *La Recherche*, 298.

Zwerling, Craig

(1976), *The emergence of the ENS as a centre of scientific education in the nineteenth century in France*, édité en 1990, Garland Publishing, Inc.

